

Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření kavitace v hydraulickém obvodu

Measurement of Cavitation in the Hydraulic Circuit

Student:

Michal Lesák

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2012

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Lesák**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Měření kavitace v hydraulickém obvodu**
Measurement of Cavitation in the Hydraulic Circuit

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše k tématu kavitace (kavitace ve vodě, kavitace v olejích, obsah vzduchu, rozpuštěný a nerozpuštěný vzduch).
2. Zpracování problematiky měření kavitace v oleji. Návrh hydraulického obvodu k měření kavitace v oleji, sestavení hydraulického obvodu.
3. Návrh postupu měření, výběr měřidel.
4. Praktické měření na hydraulickém obvodu, zpracování a vyhodnocení měřených veličin.
5. Vytvoření návodu k praktickému měření kavitace v hydraulickém obvodu.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. NOSKIEVIČ, J. a kol.: *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. SNTL Praha, 1989, 336 s., 1.vydání.
2. NOSKIEVIČ, J.: *Mechanika tekutin*, Praha SNTL, 1987, 354s.
3. KOZUBKOVÁ, M.: *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. Ostrava: VŠB-TU 2009, 130 s., ISBN 978-80-248-2043-9.
4. KOPÁČEK, J.: *Vzduch v minerálním oleji a jeho měření*. In *Strojírenství*, 36, 1986, čís. 11, s. 656-662.
5. HRUŽÍK, L., KOZUBKOVÁ, M.: *Dynamika tekutinových mechanismů – návody do cvičení*. Ostrava: FS VŠB-TU Ostrava, 2006. 82s. URL: <http://www.338.vsb.cz/seznam.thml>.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Michal Kozdera

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012



prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě 21.5. 2012

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které bylo VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženo (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. O vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 21.5. 2012

Michal Lesák
Horní Životice 180
Horní Životice 793 12


.....
podpis

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Lesák, M. *Měření kavitace v hydraulickém obvodu: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2012, 57 s. Vedoucí práce Bojko, M.

Bakalářská práce se zabývá kavitačními jevy v hydraulických obvodech. V úvodní části bakalářské práce je charakterizována problematika kavitace v hydraulických systémech. Dále v teoretické části bakalářské práce jsou popsány jednotlivé druhy kavitace a vliv rozpuštěného a nerozpuštěného vzduchu v kapalině. V praktické části bakalářské práce je realizován návrh hydraulického obvodu na praktikátoru od firmy Parker k vyšetřování kavitace na sání čerpadla. Obvod byl navržen a následně sestaven na praktikátoru od firmy Parker. Na sestaveném hydraulickém obvodu bylo provedeno praktické měření kavitace na sání čerpadla, kde byly měřeny tlaky (p) na sacím potrubí a výtlačného potrubí a také se zaznamenávaly otáčky (n) k určení objemového průtoku (Q). Výsledky jsou vyhodnoceny pomocí grafů.

THE ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Lesák, M. *Measurement of Cavitation in the Hydraulic Circuit. Bachelor thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamice and Hydraulic Equipment, 2012, 57 p. Thesis head: Bojko.M

This bachelor thesis is about cavitative phenomenon in hydraulic circumferences. In the introductory part of this work there is characterized cavitation in hydraulic circumferences. In the theoretical part of this bachelor thesis there are described individually the types of cavitation and the influence of dissolved and undissolved air in the fluid. In the practical part of the work there is realized a proposal of hydraulic circumference for practicator from Parker company which is used for investigation of cavitation on pump absorbing. The circumference was suggested and later assembled on a practicator from Parker company. On the assebled hydraulic circumference was done a practical measuring of cavitation on pump absorbing, where were measured pressures p on intake pipes and extrusion pipes and also the revolutions of (n) used to determine the volumetric rate of flow (Q) were recorded. Results are evaluated by the graph.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	- 9 -
Úvod	- 11 -
1. Kavitace	- 12 -
1.1 Kavitační jevy	- 12 -
1.2 Podstata kavitačního jevu	- 13 -
1.3 Kavitační jádro a kavitační bublina	- 13 -
1.4 Vývoj a druhy kavitace	- 17 -
1.5 Charakteristika kavitačního parametru a definice	- 19 -
1.6 Kavitace v hydraulických systémech	- 20 -
1.7 Kavitační jevy a účinky v hydraulických obvodech	- 21 -
1.8 Kavitační opotřebení povrchů hydraulických součástí:	- 23 -
2. Stlačitelnost kapalin	- 24 -
2.1 Určení modulu objemové pružnosti kapaliny	- 25 -
2.2 Rozpuštěný vzduch v kapalině	- 25 -
2.3 Nerozpuštěný vzduch v kapalině	- 27 -
3. Měření kavitace na sání čerpadla	- 29 -
3.1 Hydraulický praktikátor Stand Parker Hannifin	- 29 -
4. Měření kavitace na sání čerpadla pomocí hydraulického stendu bez zátěže	- 32 -
4.1 Schéma	- 32 -
4.2 Specifikace prvků	- 33 -
4.3 Postup měření	- 34 -
4.4 Výpočetní vztahy:	- 35 -
4.5 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot	- 35 -
4.6 Grafické vyhodnocení	- 38 -
4.7 Zhodnocení měření kavitace na sání čerpadla	- 39 -

5.	Měření kavitace na sání čerpadla pomocí hydraulického stendu se zátěží	- 40 -
5.1	Schéma.....	- 40 -
5.2	Specifikace prvků	- 41 -
5.3	Postup měření	- 42 -
5.4	Výpočetní vztahy	- 42 -
5.5	Tabulky naměřených a vypočtených hodnot	- 43 -
5.6	Grafické vyhodnocení.....	- 45 -
5.7	Vyhodnocení měření kavitace	- 46 -
6.	Návod do cvičení pro měření kavitace na trenažeru od firmy Parker.....	- 47 -
6.1	Zadání	- 47 -
6.2	Schéma zapojení	- 48 -
6.3	Specifikace prvků	- 48 -
6.4	Postup měření	- 50 -
6.5	Zpracování naměřených hodnot	- 50 -
6.6	Výpočet hodnot.....	- 50 -
6.7	Tabulka naměřených a vypočtených hodnot	- 51 -
6.8	Příklad výpočtu pro měření č. 6.....	- 52 -
6.9	Grafické vyhodnocení.....	- 52 -
6.10	Závěr	- 53 -
7.	Závěr	- 54 -
8.	Seznam použité literatury.....	- 56 -
9.	Seznam příloh	- 57 -

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Význam	Jednotka
c_l	Rychlost proudění kapaliny	$[m.s^{-1}]$
c_B	Rychlost na rozhraní bubliny	$[m.s^{-1}]$
c_p	Součinitel tlaku	$[Pa]$
c_p	Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
c_v	Měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	$[J.kg^{-1}.K^{-1}]$
K	Kavitační parametr	$[1]$
K	Absorpční součinitel	$[1]$
K_{dyn}	Dynamická stlačitelnost kapaliny	$[Pa]$
K_k	Modul pružnosti čisté kapaliny	$[Pa]$
K_{krit}	Kritický kavitační parametr	$[1]$
$K_{poč}$	Počáteční kavitační parametr	$[1]$
K_{stat}	Statická stlačitelnost kapaliny	$[Pa]$
n	Otáčky hydromotoru	$[min^{-1}]$
$p_{1abs.}$	Absolutní tlak na sacím potrubí	$[Pa]$
$p_{1rel.}$	Naměřený tlak na sacím potrubí	$[Pa]$
$p_{2abs.}$	Absolutní tlak na tlakovém potrubí	$[Pa]$
$p_{2rel.}$	Naměřený tlak na tlakovém potrubí	$[Pa]$
p_a	Atmosférický tlak	$[Pa]$
p_b	Tlak v kavitační bublině	$[Pa]$
p_k	Tlak v kapalině obklopující kavitační bublinu	$[Pa]$
p_{ko}	Počáteční tlak obklopující bublinu	$[Pa]$
p_{max}	Tlak na konci imploze kavitační bubliny	$[Pa]$
p_{REF}	Referenční tlak	$[Pa]$
p_v	Tlak plynu	$[Pa]$
p_{Vo}	Počáteční tlak plynu v bublině	$[Pa]$
p_w	Tlak nasycených par	$[Pa]$
p_{∞}	Konstantní tlak působící na kapalinu	$[Pa]$
Q	Průtok hydrogenerátoru	$[m^3.s^{-1}]$
r_B	Poloměr kulové bubliny	$[m]$

r_{Bo}	Poloměr počáteční kulové bubliny	[m]
r_{kr}	Kritický poloměr kavitační bubliny	[m]
r_{∞}	Konstantní poloměr bubliny	[m]
t	Teplota oleje	[°C]
V	Objem směsi	[m ³]
V_g	Objem plynu v kapalině	[m ³]
V_G	Geometrický objem hydromotoru	[m ³]
V_k	Objem kapaliny	[m ³]
V_{VR}	Objem rozpuštěného vzduchu v kapalině	[m ³]
Δp	Tlakový spád	[Pa]
ν	Kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
ρ_k	Hustota kapaliny	[kg.m ³]
ρ_{REF}	Referenční hustota kapaliny	[kg.m ³]
σ	Povrchové napětí	[Pa]
τ	Doba imploze bubliny	[s]

Úvod

Kavitace je nežádoucí fyzikální jev známý dlouhou dobu. Zájem o kavitaci vznikl až při konstruování složitějších hydraulických strojů a zařízení. Důkladné zkoumání kavitace mělo za příčinu vysoké nároky na hydraulické systémy (vodní turbíny, vyšší nároky na sací schopnost čerpadel), což mělo za příčinu vyšší výskyt kavitace. Kavitace se už zkoumá několik desítek let a potrvá dlouhou dobu, než se dospěje k jednoznačnému názoru na kavitační jev.

V teoretické části bakalářské práce je popsána podstata kavitačního jevu v hydraulických prvcích a systémech. Dále je nastíněna problematika vývoje kavitace a charakteristika jednotlivých druhů kavitace v hydraulických systémech. V další kapitole teoretické části je popsán vliv rozpuštěného a nerozpuštěného vzduchu v kapalině.

V praktické části jsou navrženy hydraulické obvody k měření kavitace na sání čerpadla, které je provedeno na praktikátoru od firmy Parker. Navrženy jsou dva hydraulické obvody. První hydraulický obvod je navržen bez zátěže. Takže hydraulický obvod je navržen tak, že k hydraulickému agregátu je připojen pouze rotační hydromotor. Druhý hydraulický obvod je navržen se zátěží, takže k hydraulickému agregátu je připojen rotační hydromotor a zátěž je vyvozena pomocí škrtkového ventilu. V praktické části jsou znázorněny oba hydraulické obvody. Kavitace je simulována pro různé maximální tlaky, které jsou nastaveny pomocí pojistného ventilu. K vyvození kavitace na sání potrubí je používán kulový ventil, který je umístěn v sacím potrubí. Pomocí kulového ventilu dochází ke škrcení průtoku v sacím potrubí a k vyvození podtlaku. Při měření byly zaznamenávány otáčky (n) a tlaky (p) na sacím a výtlačném potrubí. V práci je také popsána hlučnost čerpadla při simulaci kavitace, která se projevila při měření. Z vypočtených a naměřených hodnot je sestrojen graf, ze kterého je určen průběh kavitace. Dalším bodem praktické části bakalářské práce je podrobný postup měření kavitace na sání čerpadla na praktikátoru od firmy Parker.

1. Kavítace

1.1 Kavitační jevy

Tento jev vzniká při obtékání kapaliny kolem pevného tělesa za určitého stavu kapaliny, která má určitou teplotu a tlak. Vznikají malé prostory, které jsou naplněny párami, plyny, nebo směsí plynu a páry (vznik bublin plynových nebo parních). Tento jev může vznikat také ve stojící kapalině, ve které kmitá pevné těleso. Jev se nazývá kavítace.



Obr. 1.1 Kavítace na lodním šroubu [10]

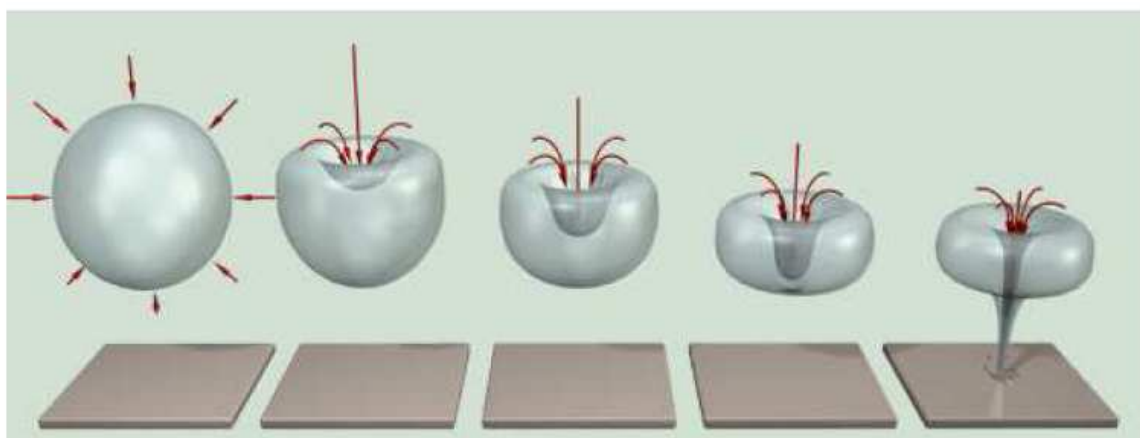
V technické praxi je kavítace dlouhodobý problém. Už na konci 19. století s ní byly problémy u lodních šroubů, jak je znázorněno na obr. 1.1 zachycující proudové pole kolem lodního šroubu. Kavítace následně způsobuje nedosažení návrhových hodnot, tedy snižuje výkon. A také docházelo k rychlému opotřebení obtékaných částí, jak lze vidět na obr. 1.2. Problému kavítace se v dnešní době věnuje velká pozornost. Dnes se kavítace zaznamenává u vodních turbín, hydrodynamických i hydrostatických čerpadel, v hydrodynamických převodech, v armaturách, v proudových přístrojích, v hydrodynamických ložiskách, u vodou chlazených spalovacích motorů, v ozubených převodech, u lodních šroubů a torpéd. [1],[2]



Obr. 1.2 Ukázka poškození lodního šroubu [10]

1.2 Podstata kavitačního jevu

Kavitace jsou jevy v kapalině, při které vznikají a zanikají bubliny-dutiny v proudící kapalině. Kavitační jev se nazývá podle latinského slova „cavitas“, které v překladu znamená dutina. Při tomto jevu dochází k narušení spojitosti kapaliny. Tento stav je určen zejména tlakem a teplotou kapaliny. Poklesne-li v daném místě tlak na určitou hodnotu, tzv. kavitační tlak, při dané teplotě kapaliny začne se kapalina odpařovat a tvoří se viditelné malé bubliny. Pokud tlak zůstává stejný nebo klesá, bublina nabírá na objemu. V proudící kapalině se bublina dostává z nižšího tlaku do vyššího tlaku, zde pára v bublinách kondenzuje, vznikají kavitační dutiny a poté, co se dutiny zaplní, bublina prudce zaniká, imploduje. Na obr. 1.3 lze vidět, jak zaniká kavitační bublina. V blízkosti obtékané stěny nebo přímo na stěně, kde bubliny zanikají, se po určité době projeví působení kavitace na poškození povrchu materiálu, která se nazývá kavitační eroze. Na obr. 1.2 lze vidět poškození lodního šroubu kavitační erozí. Kavitační jev probíhá rychlostí zvuku a napětí narůstá skokem. Při zániku bubliny dochází na krátkou dobu k obrovskému lokálnímu nárůstu teploty. [1]



Obr. 1.3 Kolabující parní bublina

1.3 Kavitační jádro a kavitační bublina

Kavitační bubliny se vyskytují tam, kde je porušena soudržnost kapaliny. Aby bublina vznikla, musí překonat kohezní sílu molekul, což je pevnost kapaliny. Molekuly se na některých místech od sebe odtrhávají. Modul objemové pružnosti kapaliny je závislý na čistotě kapaliny. Modul objemové pružnosti pro absolutně čistou vodu činí 1 013 MPa. V praxi se s touto kapalinou nesetkáme, používané kapaliny obsahují různé příměsi, jako jsou bubliny nerozpuštěného plynu nebo mechanické příměsi. Tato kapalina má podle výpočtů Zeldoviče nižší modul objemové pružnosti, a to přibližně 202 MPa. Podle dalších

experimentálních výpočtů bylo zjištěno, že se pevnost pohybuje ve výši ($10^4 \div 10^6$) Pa. Tyto hodnoty jsou značně nižší než u čisté kapaliny.

Nerozpuštěné plyny mají největší vliv na soudružnost kapaliny. Tyto plyny nazýváme tzv. *kavitačním jádrem*. Pokud kapalina obsahuje mechanické částice nebo plyny, které dokážou přenášet větší napětí než kohezní síla, potom tyto příměsi nebo plyny nemají vliv na soudružnost kapaliny.

Kavitační jádro je tvořeno nerozpuštěnými plyny a vyskytuje se v mikroskopických štěrbinách nebo trhlinách na povrchu obtékaných stěn. Z kavitačního jádra vznikají kavitační bubliny. Když dosáhne kavitační jádro kritické velikosti, začne růst, poté se stane viditelným pouhým okem jako kavitační bublina.

a) Podmínka rovnováhy pro tlak v bublině je dán rovnicí [1]

$$p_b = p_v + p_w = p_k + \frac{2 \cdot \sigma}{r_B} \quad (1.1)$$

$$p_k = p_w + \left(p_{k0} - p_w + \frac{2 \cdot \sigma}{r_{B0}} \right) + \left(\frac{r_{B0}}{r_B} \right)^3 \quad (1.2)$$

r_B	poloměr kulové bubliny	[m]
p_v	tlak plynu	[Pa]
p_w	tlak nasycených par	[Pa]
p_k	tlak v kapalině obklopující bublinu	[Pa]
σ	povrchové napětí	[Pa]
r_{B0}	počáteční poloměr bubliny	[m]
p_B	tlak v bublině	[Pa]

Index 0 značí výchozí hodnoty pro p_k a r_B , což znamená, že r_{B0} je počáteční poloměr bubliny; p_{k0} je tlak obklopující bublinu při počáteční velikosti.

Lze usuzovat, že volné plyny mají největší vliv na snížení pevnosti kapaliny. Plyny v kapalině tvoří tzv. kavitační jádra. Pokud kapalina obsahuje plyn nebo mechanické částčky, které jsou schopné přenášet napětí větší než kohezní síly, potom mez pevnosti není snížena.

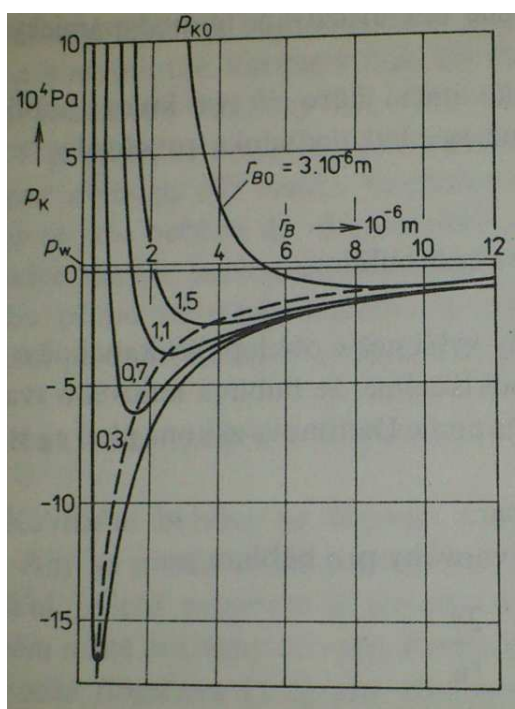
b) Dále lze definovat kritický poloměr bubliny r_{kr} [1]:

$$r_{kr} = r_{B0} \cdot \left(\frac{3 \cdot r_{B0}}{2 \cdot \sigma} \cdot p_{v0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

$$p_{v0} = p_{k0} - p_w + \frac{2 \cdot \sigma}{r_{B0}} \quad (1.4)$$

Kritický poloměr bubliny r_{kr} , což znamená, že kavitační bublina začíná expanzivně růst, je řízen vztahem (1.3) při podmínce $\frac{\partial p_k}{\partial r_{B0}} = 0$.

Z diagramu na obr. 1.4 lze usoudit, že pokud se poloměr r_B zvětší v oblasti $r_B < r_{kr}$ při konstantním p_k , bude v kapalině vyšší tlak, a proto dojde k zmenšení poloměru na počáteční velikost. Pokud dojde ke změně v oblasti $r_B > r_{kr}$, tlak bude odpovídat p_k a bublina se bude trvale zvětšovat, z čehož vyplývá nestabilní oblast. Pokud nastane snižování tlaku v okolní kapalině p_k v oblasti $r_B < r_{kr}$, poloměr bubliny se jen zvolna zvětšuje, až bublina dosáhne kritického poloměru r_{kr} , poté začne bublina expanzivně narůstat. Z grafu je patrné, že bublina začne expanzivně narůstat, pokud dosáhne nižších hodnot než je p_w . Z grafu je také patrné, že p_w je konstantní.



Obr. 1.4 Závislost rovnovážného tlaku v kapalině na poloměr bubliny pro různé počáteční velikosti bubliny [1]

c) Stanovení rychlosti na rozhraní dutiny s kapalinou c_B [1]:

Při tomto výpočtu vycházíme z rovnosti kinetické energie kapaliny a práce vykonané při změně objemu dutiny

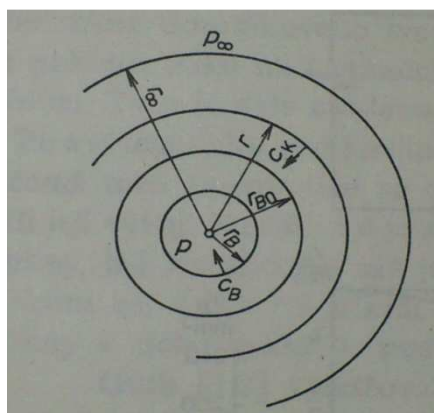
$$c_B^2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{p_m}{\rho_k} \cdot \left[\left(\frac{r_\infty}{r_B} \right)^3 - 1 \right] \quad (1.5)$$

p_∞ konstantní tlak působící na kapalinu [Pa]

ρ_k hustota kapaliny [kg.m⁻³]

r_∞ konstantní poloměr bubliny [m]

Na obr. 1.5 je stručný model zániku kavitační bubliny podle Rayleigha. Předpokládal, že bublina o průměru r_{B0} , u které předpokládáme, že neobsahuje plyn ani páru a je umístěna v nestlačitelné kapalině, je v klidu. Na kapalinu působí konstantní tlak p_∞ . Působením tohoto tlaku proudí do bubliny kapalina. Rychlost kapaliny je značena c_k a rychlost je určena ve vzdálenosti r od středu bubliny.



Obr. 1.5 Schéma bubliny [1]

Dále lze definovat dobu imploze a tlak vyvinutý na konci imploze:

d) Celková doba imploze bubliny je definována [1]:

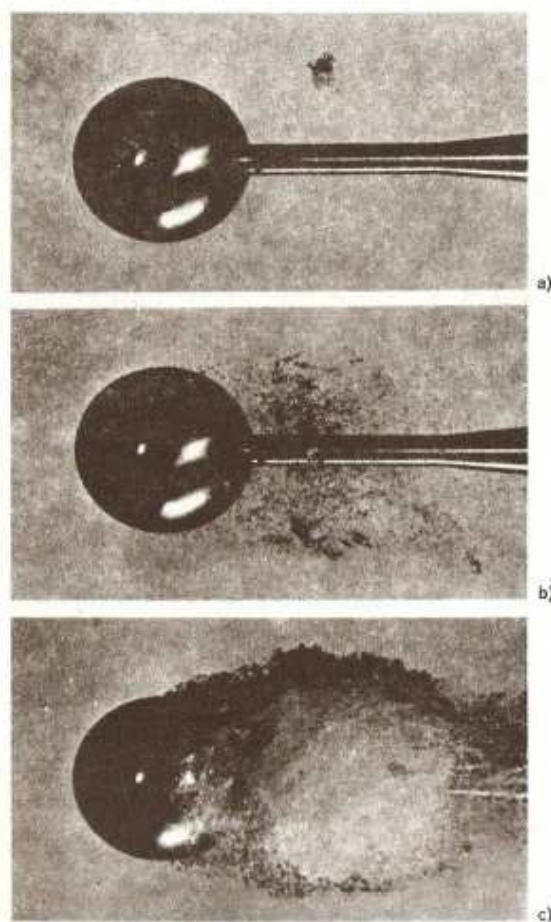
$$\tau = 0,9146 \cdot r_{B0} \cdot \left(\frac{\rho_k}{p_\infty} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

e) Tlak vyvinutý na konci imploze je definován [1]:

$$p_{max} = 0,157 \cdot \left(\frac{r_{B0}}{r_B} \right)^3 \cdot p_\infty \quad (1.7)$$

1.4 Vývoj a druhy kavitace

V kapalině se nachází mnoho kavitačních jader, které mají různé počáteční velikosti. Při dosažení kavitačního tlaku budou jádra stejné velikosti explodovat současně. Čas, který je potřebný k nárůstu kavitačního jádra do kritické hodnoty, je podle Johnsona pro bublinu o průměru 0,025 mm přibližně $<10 \mu\text{s}$, podle Knappa je tato doba $(30 \div 100) \text{ ms}$. Znamená to, že některé bubliny, které nedosáhnou kritické hodnoty, proběhnou kavitační oblastí, aniž by explodovaly. Pokud má bublina menší kavitační jádro, potřebuje k nárůstu více času. Okamžik, kdy začíná růst kavitační bublina, se nazývá *počátek kavitace*. Kavitace, která ovlivňuje definované hodnoty hydraulického stroje nebo zařízení, např. průtok, účinnost, se nazývá *plně vyvinutá kavitace*. *Částečně vyvinutá kavitace* je kavitace ve stupni vývoje mezi počátkem a plně rozvinutou kavitací. Na obr. 1.6 jsou znázorněna všechna tři stádia kavitace. Je vytvořena při konstantní rychlosti c a snižování tlaku.



Obr. 1.6 Obtékání koule kapalinou při rychlosti $c=6,3 \text{ m.s}^{-1}$ [1]

a – počátek kavitace; b – částečně vyvinutá kavitace; c – plně vyvinutá kavitace

Část proudu kapaliny je vyplněna kavitačními bublinami, které tvoří tzv. *kavitační oblast*. Počáteční kavitace vzniká při malém poklesu pod tlak nasycených par. Jeví se jako neustálená kavitační oblast. Na proudící kapalině se to projevuje menší pulsací tlaku. V tomto případě se kavitační oblast pravidelně zmenšuje a zvětšuje. Pokud snížíme tlak, kavitační oblast se zvětší a ustálí. Kavitační oblast může vznikat odtržením proudu od obtékaného povrchu. Tato oblast se od kapsovitě neliší, navzdory tomu se jedná o oblast nestálou. Důvodem této kavitace je víření kapaliny mezi hlavním proudem a obtékaným proudem.

Dále lze kavitaci dělit podle obsahu plynů [1]:

- *Parní kavitace*

Je charakterizována obsahem par vznikajících odpařováním kapaliny při dosažení tlaku nasycených par a malým množstvím nekondenzujícího plynu (vzduchu) v kapalině. Typickým příkladem je voda.

- *Bublinková kavitace*

Je charakterizována obsahem plynů v kapalině, který při změně tlaku mění svůj objem a tím se mění obsah plynu v kapalině, což má za následek stlačitelnost kapaliny. Typickým příkladem je olej.

Další dělení kavitační oblasti je následující [1]:

- *Kapsovitá*

Shluk kavitačních bublin vyplňuje určitý prostor. Tyto kavitační bubliny vznikají např. v tryskách, na lopatkách vodních strojů apod.

- *Vláknová*

Kavitační bubliny tvoří sled podobný vláknu. Kavitační oblast se také nazývá spárová kavitace. Tato kavitace se vyskytuje např. na koncích lopatek lodních šroubů nebo na koncích lopatek vodních turbín nebo za náboji lodních šroubů a u Kaplanových turbín apod.

- *Plošná*

Vzniká snížením tlaku při obtékání povrchu. Kavitační bubliny se vyskytují v těsné blízkosti obtékaného povrchu. Vyskytuje se např. u lopatek čerpadel, turbín, lodních šroubů apod.

- *Sparová*

Vzniká ve funkčních mezerách na výstupu hydraulických strojů.

1.5 Charakteristika kavitačního parametru a definice

Abychom posuzovali kavitace kvantitativně a ne jen podle členění vzniku kavitace v hydraulických zařízení nebo strojích, určujeme kavitaci pomocí kavitačního parametru K .

Při obtékání tělesa nastane podél obtékaného povrchu proměnné rozložení tlaku. V místě, kde proudění není ovlivněno obtékáním, vztaženo na dynamický tlak $\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_1^2\right)$, počítáme součinitel tlaku c_p . [1]

$$c_p = 2 \cdot \frac{p - p_1}{\rho \cdot c_1^2} \quad (1.8)$$

p	rozdíl tlaku na některém místě obtékaného povrchu	[Pa]
p_1	tlak neovlivněný obtékáním	[Pa]
c_1	rychlost proudu kapaliny	[m.s ⁻¹]
ρ	hustota kapaliny	[kg.m ⁻³]

Kromě součinitele tlaku c_p určujeme také **kavitační parametr K** , který je odvozen ze vztahu:

$$K = \frac{2 \cdot (p_1 - p_w)}{\rho \cdot c_1^2} \quad (1.9)$$

p_w	tlak nasycených par	[Pa]
-------	---------------------	------

Při vzniku první kavitační bubliny se označuje kavitační parametr $K_{poč}$. Pokud platí $K > K_{poč}$, je obtékání tělesa bezkavitační, při $K < K_{poč}$ je obtékání s kavitací. Pokud dochází k omezení maximálního průtoku, nazýváme kavitační parametr kritický a značíme K_{kr} . Kavitační parametr slouží jako podobnostní číslo při kavitačním obtékání těles, např. koule, válec, profil kanálů a lopatkových mříží. [1]

1.6 Kavítace v hydraulických systémech

Kavítace se nejčastěji vyskytovala v hydraulických obvodech, které pracovaly s vodou nebo vodními emulzemi. V hydraulických obvodech pracujících s olejem se ve větší míře nežádoucí kavitační účinky projeví až v 70. letech minulého století, kdy se zvyšovaly tlaky a průtoky v hydraulických zařízeních. Jelikož voda a olej má značně rozdílné fyzikální vlastnosti, nelze výsledky kavítace ve vodě převádět na olej.

Kapaliny používané v hydraulických obvodech rozdělujeme do dvou základních skupin.

- a) Kapaliny na bázi minerálních olejů
- b) Těžkozápallné kapaliny (olejové emulze, roztoky polyglykolové, syntetické kapaliny)

Fyzikální vlastnosti mají velký vliv na tvorbu kavítace, především velikost tlaku nasycených par. V tabulce 1.1 můžeme porovnat několik kapalin, jak se liší tlak při dvou různých teplotách. Z tabulky je zřejmé, o jak velký rozdíl tlaků se jedná u minerálního oleje oproti vodě. Další vlastnosti mající vliv na kavítaci jsou uvedeny v tab. 1.1 - 1.2.

Tab. 1.1. Tlak nasycených par kapalin pro různé kapaliny v závislosti na teplotě [1]

Teplota [°C]	Tlak nasycených par kapalin [Pa]			
	Voda	Minerální olej	Roztok polyglykolu- voda	Syntetická kapalina
50	$0,12 \cdot 10^5$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$0,08 \cdot 10^5$	2
70	$0,31 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^{-2}$	$0,18 \cdot 10^5$	13

Tab. 1.2. Hustota, modul objemové pružnosti, povrchové napětí, rozpustnost vzduchu a kinematická viskozita kapalin. Porovnány pro různé pracovní kapaliny. [1]

Kapaliny	Vlastnosti a rozměry						
	Hustota ρ při 20°C [kg.m ⁻³]	Modul objemové pružnosti K [Pa]	Povrchové napětí σ [N.m ⁻¹]	Bunsenův součinitel α_v rozpustno sti vzduchu při 20°C [1]	kinematická viskozita v [m ² .s ⁻¹]		
					při 20°C	při 40°C	při 60°C
Voda	1000	2,2.10 ⁹	7,3.10 ⁻²	0,02	1.10 ⁻⁶	0,6.10 ⁻⁶	0,4.10 ⁻⁶
Minerální olej	870 až 900	1,6.10 ⁹	3,5.10 ⁻²	0,08 až 0,1	1,02.10 ⁻⁴	0,37.10 ⁻⁴	0,17.10 ⁻⁴
roztok polyglykolu- voda	1010 až 1090	(3 až 3,5).10 ⁹	(3 až 4).10 ⁻²	0,01 až 0,02	0,89.10 ⁻⁴	0,37.10 ⁻⁴	0,18.10 ⁻⁴
syntetická kapalina	1100 až 1300	(2,3 až 3).10 ⁹	(2,5 až 4,5).10 ⁻²	0,08 až 0,09	1,48.10 ⁻⁴	0,37.10 ⁻⁴	0,16.10 ⁻⁶

1.7 Kavitační jevy a účinky v hydraulických obvodech

V hydraulických obvodech vzniká kavitace v důsledku poklesu tlaku zúžením průřezu zvýšením rychlosti proudu, odtržením proudu s tvořením vírů při značném odklonu proudu, odtržením proudu při nedostatečné dodávce kapaliny a jednou z příčin může být i kmitání, které má za následek tlakové vlny.

Održení proudu a víření vzniká např. v sacích prostorách čerpadla, ventilech, v ohybech potrubí, v přechodech potrubí. Zúžení průřezu se vyskytuje v obvodech, např. ve clonách, na hranách regulačních orgánů, mezerách, drážkách. Plyny, především vzduch, v kapalině, mají špatný vliv na funkčnost hydraulického obvodu. Jejich důsledkem se snižuje modul objemové pružnosti kapaliny, a proto v hydraulických obvodech vznikají snadněji tlakové pulzace a nestabilní stavy. Při této situaci jsou funkce hydraulický pohon, řízení a regulace narušeny nebo znemožněny a v nejhorším případě může dojít k poruše součásti a zařízení.

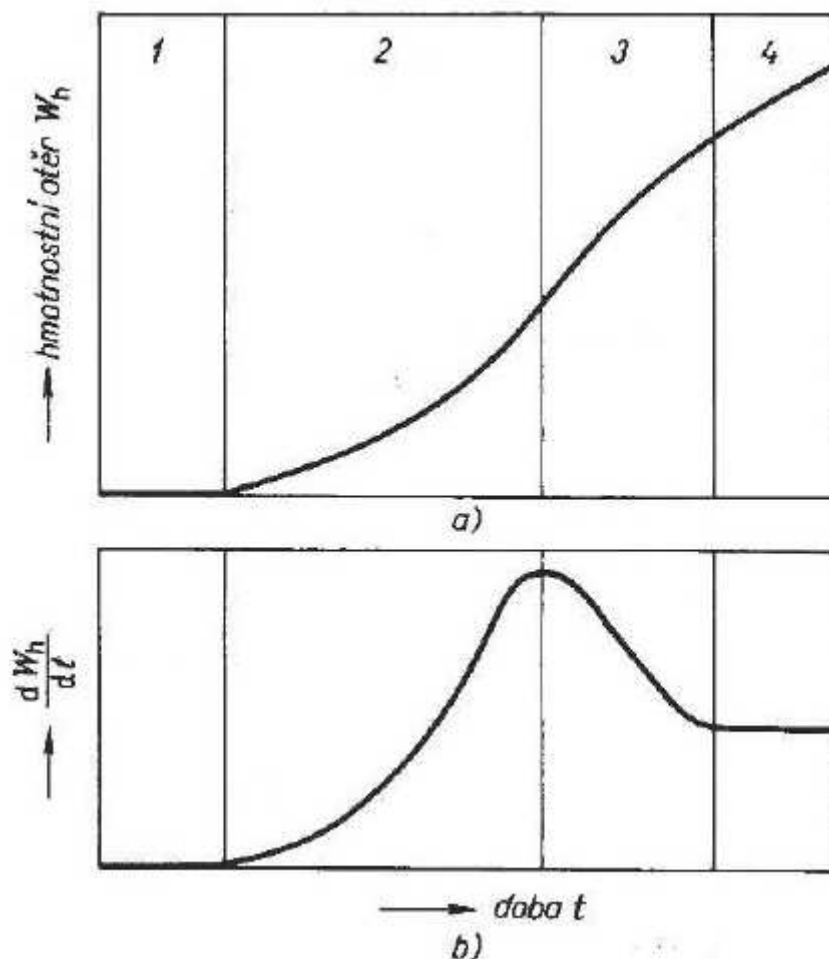
V hydraulických obvodech se kavitace projevuje hlukem, ovlivňuje kvalitu kapaliny, provoz zařízení a životnost prvků. Kavitace způsobuje hluk v čerpadlech a ventilech. Tato hlučnost může dosáhnout až 90 dB a pak musíme použít vhodné opatření ke snížení. Kavitace také způsobuje urychlení stárnutí oleje (oxidace minerálního oleje) kavitačními bublinkami, které obsahují také vzduch. Pokud se bubliny neodloučí v olejové nádrži, dochází ke znovu nasátí hydrogenerátorem, což může vést k poškození hydrogenerátoru. Další příčinou nasávání bublin je nevyužití pracovního prostoru hydrogenerátoru, a tím snížení průtoku.

Nejhorší působení kavitace se projevuje na kavitační erozí materiálu. Pokud pracovní kapalina je voda, kavitační eroze způsobuje provozní poruchy a dochází k předčasnému vyřazení prvků, především ventilů. U hydraulických obvodů, pracujících s tlaky ($5 \div 12$) MPa se kavitace vyskytuje velmi zřídka. V hydraulických obvodech s pracovními tlaky ($20 \div 40$) MPa se stává kavitace velkým problémem. To platí také v obvodech s minerálními oleji nebo syntetickými kapalinami. Kavitační opotřebení nejvíce zasahuje hydrogenerátory a hydromotory, méně se vyskytuje u ventilu a zřídka u potrubí. Kavitační opotřebení vzniká v místech, kde zanikají kavitační bubliny, které jsou naplněny především parami. Kavitace uvolňuje částice, které znečišťují pracovní kapalinu, a tím způsobuje větší mechanické opotřebení.

Kavitační opotřebení můžeme rozdělit na dvě části. Na kavitaci vyvolanou stlačením bubliny a účinkem paprsku kapaliny. Kapalina s vysokým tlakem protékajícím škrcením nabývá vysokou rychlost. Poté paprsek s vysokou rychlostí dopadá na povrch materiálu a vyvolává kavitační účinek a opotřebení materiálu.

1.8 Kavitační opotřebení povrchů hydraulických součástí:

Poškození materiálu kavitací je ovlivněno rychlostí proudění kapaliny, materiálem součástí, velikostí dílů, korozním působením kapaliny, drsností povrchu součástí, teplotními a termodynamickými vlivy, charakteristikou kapaliny a obsahem rozpuštěných plynů v kapalině. Na obr. 1.7 je znázorněno rozdělení působení kavitace do jednotlivých oblastí. V první části křivky se postupně kumuluje poškození povrchové vrstvy. V druhé části křivky dochází k oddělování materiálu formou částic otěru od povrchu. Dochází k výraznému opotřebení. Třetí část křivky odpovídá oblasti útlumu a čtvrtá část ustálenému režimu kavitálního poškození. [11]



Obr. 1.7 Průběh kavitačního opotřebení [11]

a – kavitační opotřebení znázorněno na hmotnostním ořevu v závislosti na čase; b – kavitační opotřebení znázorněno závislost času na množství opotřebení

2. Stlačitelnost kapalin

V hydraulických obvodech se nejčastěji používají minerální oleje, voda, těžkozápalná kapalina a syntetická kapalina. Tyto kapaliny obsahují vzduch, který můžeme rozdělit na dvě části a to na rozpuštěný a nerozpuštěný vzduch v kapalině. Vzduch obsažený v kapalině ovlivňuje vlastnosti kapaliny a také výsledky měření. Proto je stlačitelnost kapalin charakterizována modulem pružnosti kapaliny. Ve většině výpočtů se tento modul udává jako konstanta, nebo se snižuje o (10 ÷ 50) %. [3]

Základní definice modulu objemové pružnosti je definována podle vztahu pro hustotu kapaliny $d\rho = \frac{\rho}{K} dp$, tj. přesněji:

$$\rho = \rho_{ref} \cdot \left(1 + \frac{p - p_{ref}}{K}\right) \quad (2.1)$$

p_{ref}	referenční hodnota tlaku	[kg.m ⁻³]
p	tlak kapaliny	[Pa]
ρ_{ref}	referenční hodnota hustoty	[Pa]
ρ	hustota kapaliny	[kg.m ⁻³]
K	modul pružnosti kapaliny	[Pa]

Rozlišujeme dva druhy modulů objemové pružnosti, a to dynamický a statický. Vycházíme z rovnice 2.2, kde je zřejmé, že podíl dynamického a statického modulu objemové pružnosti odpovídá podílu měrných tepelných kapacit oleje.

$$\frac{K_{dyn}}{K_{stat}} = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.2)$$

K_{dyn}	dynamický modul pružnosti	[Pa]
K_{stat}	statický modul pružnosti	[Pa]
c_p	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
c_v	měrná tepelná kapacita při konstantním objemu	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]

2.1 Určení modulu objemové pružnosti kapaliny

Abychom neměli ovlivněné řešení, musíme určit dostatečně přesně modul objemové pružnosti kapaliny K_k . Modul pružnosti můžeme určit pomocí následujících metod:

- Kapacitní metody
- Měření rychlosti vzduchu
- Měření hustoty
- Fotoelektrické metody
- Anemometrie
- Metoda odebírání vzorků

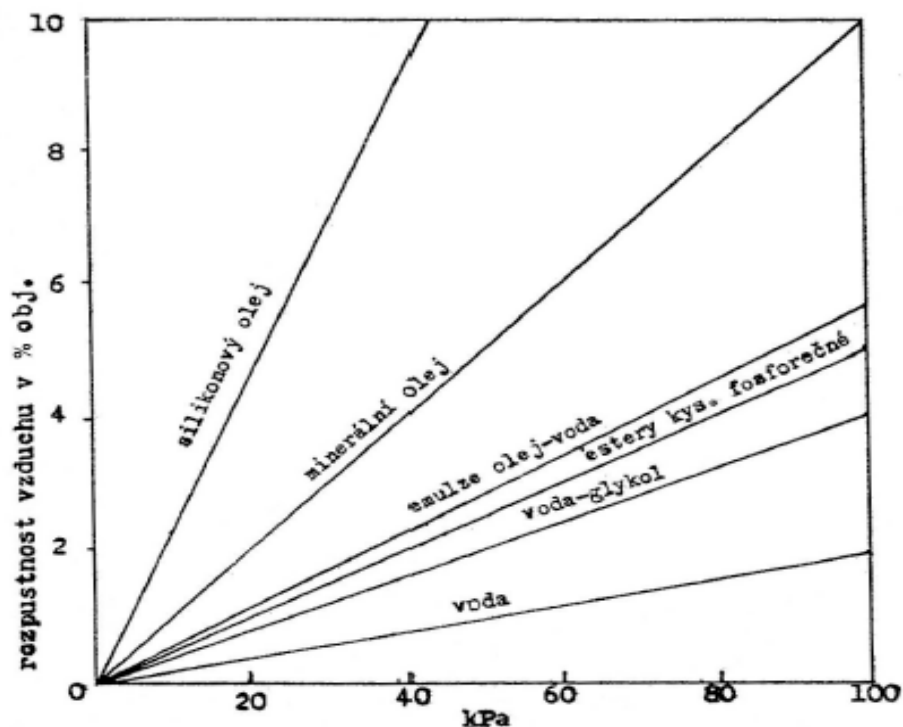
2.2 Rozpuštěný vzduch v kapalině

Objem rozpuštěného vzduchu v kapalině určujeme pomocí Henryho zákona.

$$V_{vr} = V_k \cdot k \cdot \frac{p_2}{p_a} \quad (2.3)$$

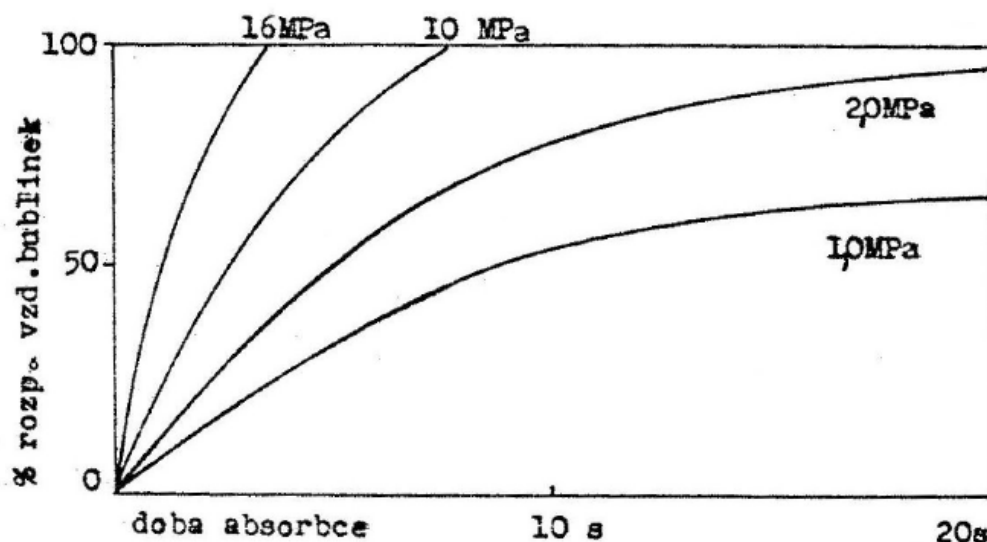
k	absorbční součinitel	[1]
p_a	atmosférický tlak	[Pa]
p_2	tlak na konci děje	[Pa]
V_k	objem kapaliny	[m ³]
V_{vr}	objem rozpuštěného vzduchu v kapalině	[m ³]

Množství rozpuštěného vzduchu je také mírně závislé na teplotě kapaliny, ale v rozsahu teplot (20 ÷ 80) °C je téměř konstantní. Z rovnice (2.3) vyplývá, jestliže budeme zvyšovat tlak p_2 , bude obsah vzduchu narůstat. Když dojde k porušení rovnovážného stavu, při kterém došlo k nasycení kapaliny vzduchem, a to z důvodu změny tlaku nebo teploty kapaliny, dochází k tvorbě bublin v kapalině, což má za příčinu tvorbu směsi kapaliny a vzduchu, nebo naopak vzduch se rozpouští do kapaliny. Na obr. 2.1 je znázorněna rozpustnost vzduchu ve vodě, roztoku polyglykolu-vody, emulze oleje-vody, minerálního oleje a silikonových olejů, kde na ose x je znázorněn tlak působící na kapalinu a na ose y je znázorněna rozpustnost vzduchu do 10 % objemu vzduchu v kapalině. Nejúčinnější rozpustnost vzduchu je v silikonových olejích a nejhorší u vody, jak lze odečíst z obr. 2.1.



Obr. 2.1 Rozpustnost vzduchu v hydraulických kapalinách [4]

K vylučování vzduchu dochází za sníženého tlaku (podtlaku). Obsah uvolněného vzduchu závisí na velikosti podtlaku. Pokud je podtlak velký, může způsobit vytvoření pěny na povrchu kapaliny. I když je kapalina stlačována hydrogenerátorem, nedojde při vysokém tlaku k úplnému rozpuštění vzduchu zpět do kapaliny. Rozpouštění vzduchu je závislé na čase a tlaku, a proto část bublin pokračuje spolu s kapalinou dále do obvodu. Na obr. 2.2 je znázorněno procento rozpuštěného vzduchu na čase při různých tlacích. Z obr. 2.1 lze usoudit, že čím větší tlak, tím je vzduch rychleji absorbován.



Obr. 2.2 Rozpustnost vzduchu závislá na tlaku a čase [4]

Příčiny tvorby směsi kapaliny a vzduchu může být mnoho, např. změnou tlaku, teploty a rychlosti proudění, další příčiny mohou být přísávání vzduchu netěsným vedením a nádrže, provzdušňováním kapaliny, nesprávně upravenými výtoky. Bubliny vzduchu ovlivňují vlastnosti kapaliny nezávisle na velikosti bublin. Vzduch v kapalině způsobuje zhoršení mechanických vlastností a také tzv. Dieselův efekt, což znamená rychlé stárnutí oleje.

2.3 Nerozpuštěný vzduch v kapalině

Nerozpuštěný vzduch ovlivňuje výrazně modul objemové pružnosti kapalin. Vzduch v kapalině je obsažen v podobě bublinek. Kapalina obsahující nerozpuštěný vzduch už není brána jako homogenní prostředí, ale jako suspenze vzduchu v kapalině. Modul objemové stlačitelnosti vzduchu je $K=1,4 \cdot 10^6$ Pa, z toho vyplývá, že vzduch má o tři řády menší stlačitelnost než kapalina.

Modul pružnosti směsi bez obsahu vzduchu je odvozen z modulu objemové pružnosti čisté kapaliny:

$$K_k = -V_k \cdot \frac{dp}{dV_k} \quad (2.4)$$

K_k modul pružnosti čisté kapaliny [Pa]

V_k objem kapaliny [m^3]

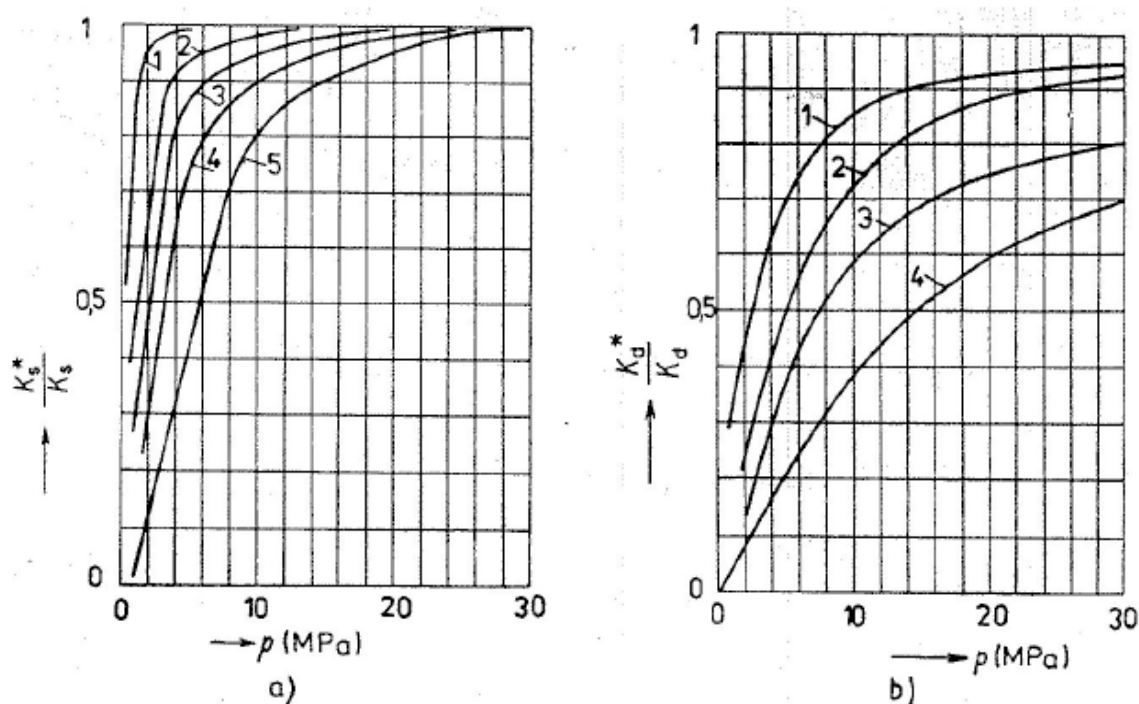
Modul pružnosti směsi s obsahem vzduchu je následně definován z rovnice:

$$K = -V \cdot \frac{dp}{dV} \quad (2.5)$$

$V = V_k + V_g$ objem směsi, (kapalina + plyn) $[m^3]$

V_g objem plynu v kapalině $[m^3]$

Modul objemové pružnosti klesá v závislosti na množství volného vzduchu. Na obr. 2.3 je znázorněn průběh, kde na ose y je podíl statického (a), dynamického (b) modulu objemové pružnosti K_s^* , K_d^* provzdušněného oleje a statického (a), dynamického (b) modulu objemové pružnosti K_s , K_d neprovzdušněného oleje v závislosti na tlaku p , který je na ose x. V grafech jsou zaznamenány hodnoty pro minerální olej při různých procentech obsahu vzduchu v kapalině.



Obr. 2.3 Poměr modulu pružnosti minerálního oleje

- a) Statický modul pružnosti – obsah vzduchu: (1 ÷ 0,1)%; (2 ÷ 1)%; (3 ÷ 2)%; (4 ÷ 4)%; (5 ÷ 8)%
- b) Dynamický modul pružnosti – obsah vzduchu: (1 ÷ 0,1)%; (2 ÷ 1)%; (3 ÷ 2)%; (4 ÷ 4)%; (5 ÷ 8)%

Z grafů můžeme usoudit, že nerozpuštěný vzduch má menší vliv na objemový modul pružnosti při vyšších tlacích.

3. Měření kavitace na sání čerpadla

V praktické části bakalářské práce jsem se zabýval kavitací na sání čerpadla. K měření jsem využil praktikátor od firmy Parker, kde jsem simuloval kavitaci na sání čerpadla pomocí škrcení průtoku kulovým ventilem. Navrhl jsem dva hydraulické obvody. První obvod byl bez zátěže, tzv. přímé zapojení čerpadla s rotačním hydromotorem, a druhý hydraulický obvod byl se zátěží, kdy do obvodu jsem zapojil kromě rotačního hydromotoru také škrtící ventil. Při měření jsem zaznamenával tlaky v sacím potrubí (p_{1rel}), v tlakovém potrubí (p_{2rel}) a otáčky hydromotoru (n).

3.1 Hydraulický praktikátor Stand Parker Hannifin

Tento praktikátor umožňuje zapojení různých hydraulických obvodů a následně procvičovat jednotlivé úlohy, např. nastavování průtoku pomocí ovládacího ventilu, průtok čerpadla, standardní okruh, test těsnosti, redukční okruh, zpomalení pohybu pístnice, okruh s více rychlostmi, kavitace aj. Praktikátor obsahuje moderní prvky, sady šroubení, potrubí a rychlospojek, hadice a elektro rozvaděče. Hydraulické obvody sestavujeme pomocí propojovacích prvků hadic s bezúkapovými rychlospojkami. [6]

Foto hydraulického praktikátoru od firmy Parker je zobrazen na obr. 3.1 a obr. 3.2

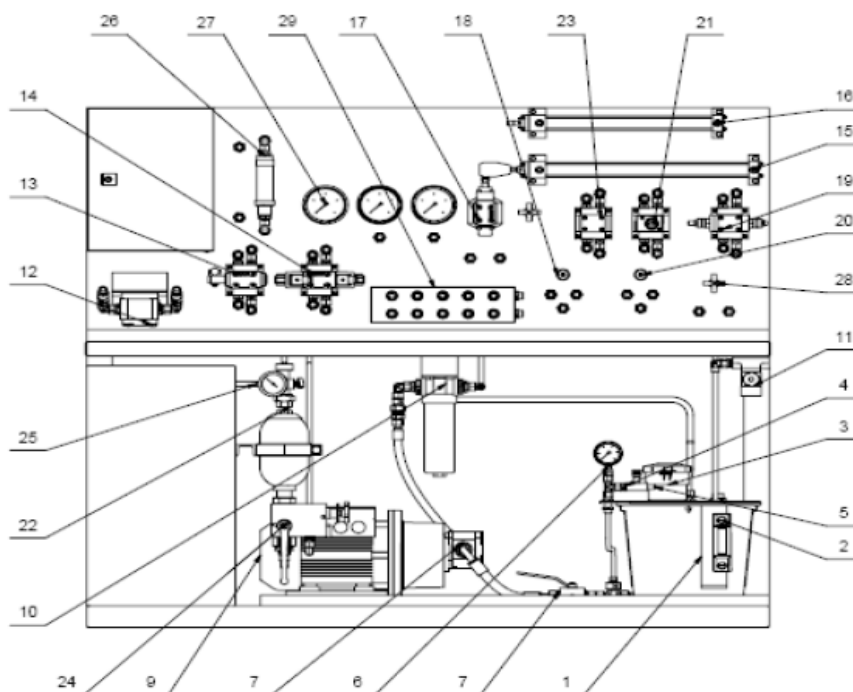


Obr. 3.1 Praktikátor od firmy Parker



Obr. 3.2 Spodní část praktikátoru

Schéma praktikátoru od firmy Parker na obr. 3.3



Obr. 3.3 Schéma praktikátoru [6]

Specifikace hydraulických prvků na praktikátoru od firmy Parker [6]

pozice	Název	Typ
1	Nádrž	3P-BAL0005
2	Stavoznak s teploměrem	FL6922
3	Vzduchový filtr	EAB10PO20HC7
4	Škrťící ventil	9N400S
5	Vzduchový tlumič	P6M-BAA2
6	Vakuometr	P6G-FRA1V10
7	Kulový ventil	KH18LCFX
8	Zubové čerpadlo 8cm ³ /ot	PGP511A0080AA1H2NE5EB1B1
9	Elektromotor 1,5kW, 220V	Siemens 1LF 7096-4AB10-Z
10	Filtr	15CN210QEVMMKG124
11	Tlakový ventil	RDM2PT06KGV
12	Zubový motor	PGM511A0100BL6H2NE3EB1B1N2
13	Rozváděč ruční	D1DV1BN
14	Rozváděč elektromagnetický	D1VW001CNTW
15	Hydraulický válec	32CCHMIRL14MCx450.000M11
16	Hydraulický válec	32CCHMIRL14MCx364.000M11
17	Rozváděč s mech. ovládáním	D1VL020HN4J
18	Sekvenční ventil	SVH101S10
19	Jednosměrný škrťící ventil	FM2DDKV
20	Redukční ventil	PR103S06
21	Škrťící ventil se stab. tlak. spádu	GFG2PK18-10
22	Akumulátor	BAE01B3R1C1
23	Zpětný ventil	CM2DDV
24	Akumulátorový blok	SBA20MT1-070
25	Plnicí ventil akumulátoru	UCA01
26	Průtokoměr	FM26222212
27	Manometr	PGF.1001.100
28	Škrťící ventil jehlový	9MV400SV
29	Blok	3P-BLOK VD-3-2220.01

Tab. 1 Specifikace prvků

Určení geometrického objemu

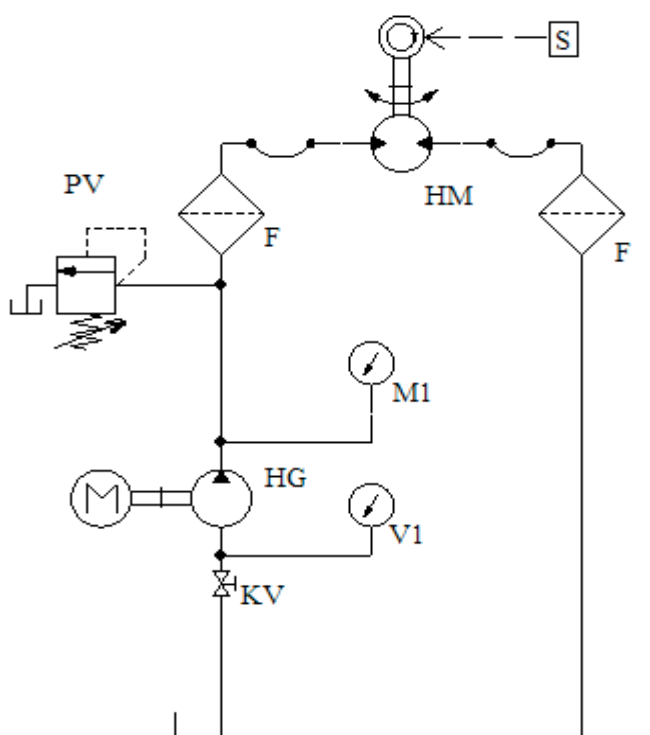
Z katalogových listů firmy Parker jsem zjistil geometrický objem zubového hydromotoru, který je $V_m = 10 \text{ cm}^3 = 0,01 \text{ dm}^3$. [6]

4. Měření kavitace na sání čerpadla pomocí hydraulického stendu bez zátěže

Na základě návrhu hydraulického obvodu jsem sestavil obvod na praktikátoru od firmy Parker. Tento obvod jsem sestavil bez zátěže, a to že k hydrogenerátoru HG jsem připojil pouze rotační hydromotor HM. Kavitaci jsem vyvozoval pomocí kulového ventilu KV umístěného v sacím potrubí obr. 4.3. Pro jednotlivé polohy jsem měřil podtlak v sání (p_{1rel}) tlak ve výtlačném potrubí (p_{2rel}) a otáčky hydromotoru (n). Měření jsem provedl při nastavených tlacích (6, 8, 10 a 12)bar na pojistném ventilu PV. Následně jsem hodnoty vyhodnotil do grafů.

4.1 Schéma

Schéma zapojení obvodu pro měření kavitace na zubovém hydrogenerátoru HG je znázorněno na obr. 4.1



Obr. 4.1 Schéma zapojení hydraulického obvodu

4.2 Specifikace prvků

HG – Hydrogenerátor PGP511A0080AA1H2NE5EB1B1

M1 – Manometr PGF.1001.100

V1 - Vakuometr P6G-FRA1V10 (rozsah 0 až -1 bar, přesnost 1,6%, maximální teplota kapaliny 60°C)

HM – Hydromotor PGM511A0100BL6H2NE3E3B1B1N2

S – Snímač otáček

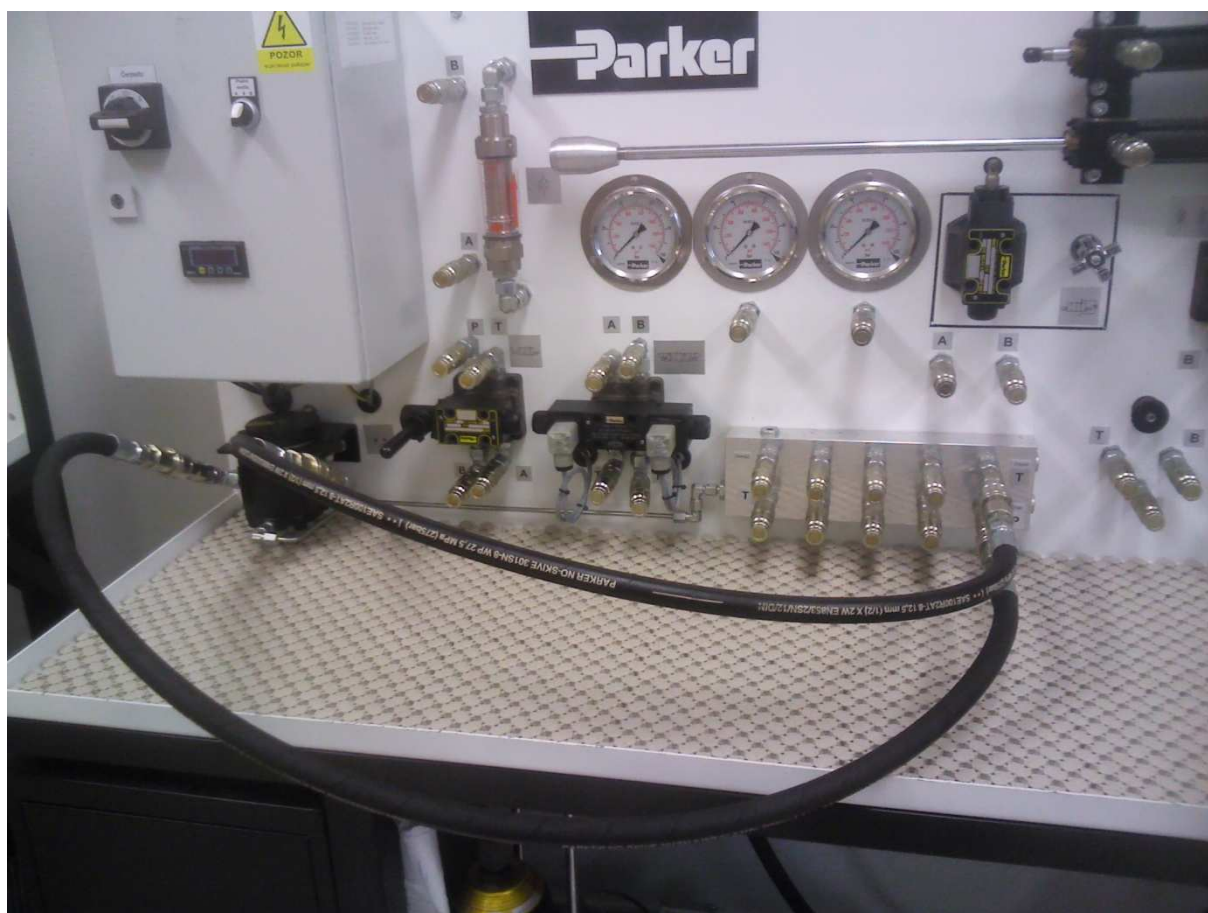
KV – Kulový ventil KH18LCFX

PV – Pojistný ventil RDM2PT06KGV

M – Elektromotor 1,5kW, 220 V, Siemens 1LF 7096-4AB10-Z

F – Filtr 15CN210QEVMMKG124

Foto reálného zapojení obvodu pro měření kavitace bez zátěže je znázorněno na obr. 4.2. Detail kulového ventilu KV, kterým simulujeme kavitaci je znázorněn na obr. 4.3.



Obr. 4.2 Reálné zapojení obvodu bez zátěže



Obr. 4.3 Detail kulového ventilu umístěného na sání čerpadla

4.3 Postup měření

1. Nejdříve jsem zapojil obvod na praktikátoru od firmy Parker podle schématu, které je znázorněno na obr. 4.1.
2. Následně jsem nastavil požadovaný tlak (6, 8, 10 nebo 12) bar na pojistném ventilu PV. Poté jsem spustil hydrogenerátor HG při otevřeném kulovém ventilu KV na sání čerpadla.
3. Do připravené tabulky jsem si zaznamenával otáčky (n) hydromotoru HM, tlak v sacím potrubí ($p_{1rel.}$) a tlak v tlakovém potrubí ($p_{2rel.}$)
4. Následně jsem přivřel kulový ventil KV o tlak cca $(-0,1 \div -0,05)$ bar na vakuometru a poté opět odečetl hodnoty jako v kroku 3.
5. Opakoval jsem kroky 3 a 4 do podtlaku na sání čerpadla 0,85 bar.
6. Po dokončení měření jsem přenastavil pojistný ventil PV na další hodnotu, jak je uvedeno v bodě 2.
7. Z naměřených hodnot jsem vypočítal průtok (Q), tlakový spád (Δp), absolutní tlaky ($p_{1abs.}$), ($p_{2abs.}$) a sestrojil jsem grafy $p_{1rel.} = f(Q)$

4.4 Výpočetní vztahy:

Vzorový výpočet pro hodnoty 10. měření při nastavení pojistného ventilu PV na 12 bar.

Průtok Q:

$$Q = V_g \cdot n = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1110 = 11,10[\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (4.1)$$

$$, \text{ kde } V_g = 10 \cdot 10^{-3} \text{ dm}^3$$

Tlakový spád Δp :

$$\Delta p = p_2 - p_1 = 10 - (-0,73) = 10,73[\text{bar}] \quad (4.2)$$

Výpočet absolutních tlaku $p_{1\text{abs.}}$ a $p_{2\text{abs.}}$:

$$p_{1\text{abs}} = p_{1\text{rel.}} + p_{\text{atm.}} = -0,73 + 1,0125 = 0,283[\text{bar}] \quad (4.3)$$

$$p_{2\text{abs}} = p_{2\text{rel.}} + p_{\text{atm.}} = 10 + 1,0125 = 11,0125[\text{bar}] \quad (4.4)$$

4.5 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

V tab. 4.1 jsou hodnoty při nastavení tlaku na pojistném ventilu PV na 6 bar, v tab. 4.2 na 8 bar, v tab. 4.3 na 10 bar a v tab. 4.4 na 12 bar.

č.měř.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				Zvuk HG
	$p_{1\text{ rel.}}$	$p_{2\text{ rel.}}$	n	$p_{1\text{ abs.}}$	$p_{2\text{ abs.}}$	Δp	Q	
[-]	[bar]	[bar]	[min ⁻¹]	[bar]	[bar]	[bar]	[dm ³ .min ⁻¹]	[-]
1	-0,05	6	593	0,963	7,013	6,05	5,93	standardní hlučnost HG (bez kavitace)
2	-0,1	6	594	0,913	7,013	6,10	5,94	
3	-0,15	6	594	0,863	7,013	6,15	5,94	
4	-0,2	6	595	0,813	7,013	6,20	5,95	
5	-0,25	6	597	0,763	7,013	6,25	5,97	
6	-0,3	6	596	0,713	7,013	6,30	5,96	
7	-0,35	6	596	0,663	7,013	6,35	5,96	
8	-0,4	6	595	0,613	7,013	6,40	5,95	nepravidelný charakteristický zvuk HG (počátek kavitace, částečně rozvinutá kavitace)
9	-0,45	6	592	0,563	7,013	6,45	5,92	
10	-0,5	6	593	0,513	7,013	6,50	5,93	
11	-0,55	6	590	0,463	7,013	6,55	5,9	
12	-0,6	6	588	0,413	7,013	6,60	5,88	
13	-0,65	5,8	578	0,363	6,813	6,45	5,78	velká hlučnost HG (plně rozvinutá kavitace)
14	-0,7	5,8	568	0,313	6,813	6,50	5,68	
15	-0,75	5,5	532	0,263	6,513	6,25	5,32	
16	-0,8	5	473	0,213	6,013	5,80	4,73	
17	-0,85	4	392	0,163	5,013	4,85	3,92	

Tab. 4.1 Hodnoty při nastavení pojistného ventilu na tlak 6 bar

č.měř	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				Zvuk HG
	p ₁ rel.	p ₂ rel.	n	p ₁ abs.	p ₂ abs.	Δp	Q	
[-]	[bar]	[bar]	[min ⁻¹]	[bar]	[bar]	[bar]	[dm ³ .min ⁻¹]	[-]
1	-0,05	8	908	0,963	9,013	8,05	9,08	standardní hlučnost HG (bez kavitace)
2	-0,1	8	910	0,913	9,013	8,10	9,1	
3	-0,2	8	911	0,813	9,013	8,20	9,11	
4	-0,3	8	906	0,713	9,013	8,30	9,06	
5	-0,35	8	910	0,663	9,013	8,35	9,1	nepravidelný charakteristický zvuk HG (počátek kavitace, částečně rozvinutá kavitace)
6	-0,4	8	914	0,613	9,013	8,40	9,14	
7	-0,5	8	912	0,513	9,013	8,50	9,12	
8	-0,6	7,9	904	0,413	8,913	8,50	9,04	
9	-0,7	7,9	894	0,313	8,913	8,60	8,94	velká hlučnost HG (plně rozvinutá kavitace)
10	-0,76	7,9	860	0,253	8,913	8,66	8,6	
11	-0,8	7,5	820	0,213	8,513	8,30	8,2	
12	-0,85	6	648	0,163	7,013	6,85	6,48	

Tab. 4.2 Hodnoty při nastavení pojistného ventilu na tlak 8 bar

č.měř	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				Zvuk HG
	p ₁ rel.	p ₂ rel.	n	p ₁ abs.	p ₂ abs.	Δp	Q	
[-]	[bar]	[bar]	[min ⁻¹]	[bar]	[bar]	[bar]	[dm ³ .min ⁻¹]	[-]
1	-0,05	10	855	0,963	11,013	10,05	8,55	standardní hlučnost HG (bez kavitace)
2	-0,1	10	862	0,913	11,013	10,10	8,62	
3	-0,15	10	866	0,863	11,013	10,15	8,66	
4	-0,2	10	872	0,813	11,013	10,20	8,72	
5	-0,25	10	874	0,763	11,013	10,25	8,74	
6	-0,3	10	877	0,713	11,013	10,30	8,77	
7	-0,35	10	880	0,663	11,013	10,35	8,8	nepravidelný charakteristický zvuk HG (počátek kavitace, částečně rozvinutá kavitace)
8	-0,4	10	880	0,613	11,013	10,40	8,8	
9	-0,45	10	882	0,563	11,013	10,45	8,82	
10	-0,49	9,9	882	0,523	10,913	10,39	8,82	
11	-0,55	9,8	880	0,463	10,813	10,35	8,8	
12	-0,63	9,7	880	0,383	10,713	10,33	8,8	
13	-0,7	9,3	875	0,313	10,3125	10	8,75	velká hlučnost HG (plně rozvinutá kavitace)
14	-0,75	9	860	0,263	10,0125	9,75	8,6	
15	-0,8	8,3	840	0,213	9,3125	9,1	8,4	
16	-0,85	8	762	0,163	9,0125	8,85	7,62	

Tab. 4.3 Hodnoty při nastavení pojistného ventilu na tlak 10 bar

č.měř.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				Zvuk HG
	p _{1 rel.}	p _{2 rel.}	n	p _{1 abs.}	p _{2 abs.}	Δp	Q	
[-]	[bar]	[bar]	[min ⁻¹]	[bar]	[bar]	[bar]	[dm ³ .min ⁻¹]	[-]
1	-0,05	12	1164	0,963	13,013	12,05	11,64	standardní hlučnost HG (bez kavitace)
2	-0,1	12	1168	0,913	13,013	12,10	11,68	
3	-0,15	12	1168	0,863	13,013	12,15	11,68	
4	-0,2	12	1168	0,813	13,013	12,20	11,68	nepravidelný charakteristický zvuk HG (počátek kavitace, částečně rozvinutá kavitace)
5	-0,3	12	1168	0,713	13,013	12,30	11,68	
6	-0,4	12	1168	0,613	13,013	12,40	11,68	
7	-0,5	11	1150	0,513	12,013	11,50	11,5	
8	-0,55	10	1140	0,463	11,013	10,55	11,4	
9	-0,65	10	1130	0,363	11,013	10,65	11,3	velká hlučnost HG (plně rozvinutá kavitace)
10	-0,73	10	1110	0,283	11,013	10,73	11,1	
11	-0,77	10	1085	0,243	11,013	10,77	10,85	
12	-0,85	9,1	940	0,163	10,113	9,95	9,4	

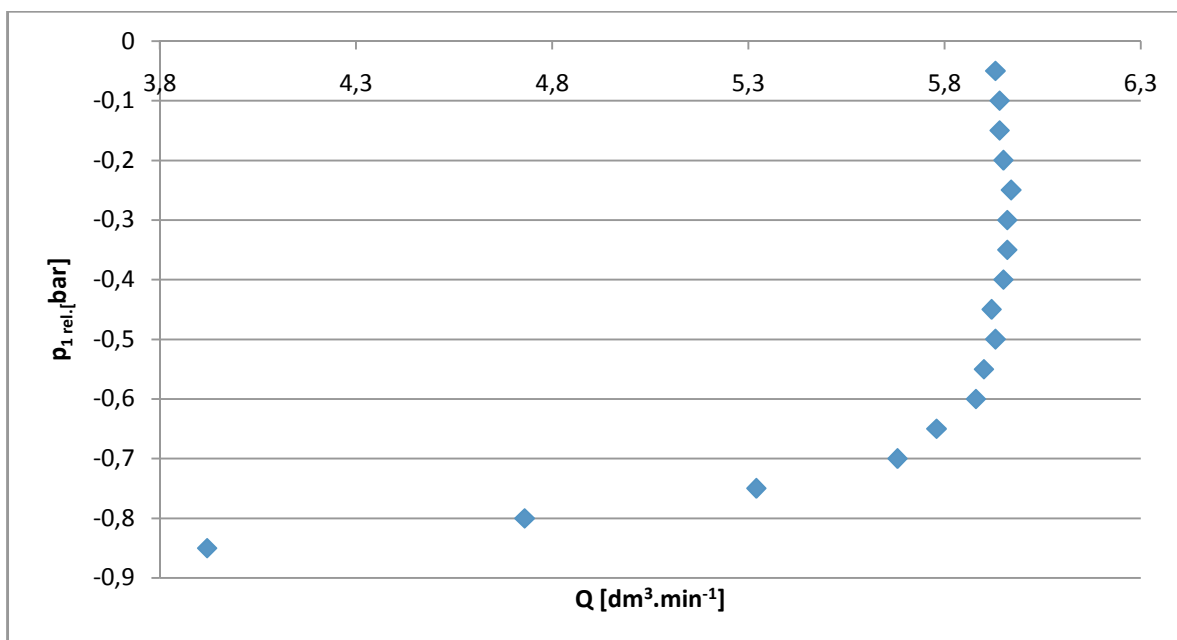
Tab. 4.4 Hodnoty při nastavení pojistného ventilu na tlak 12 bar

Legenda k tab. 4.1 – 4.4.:

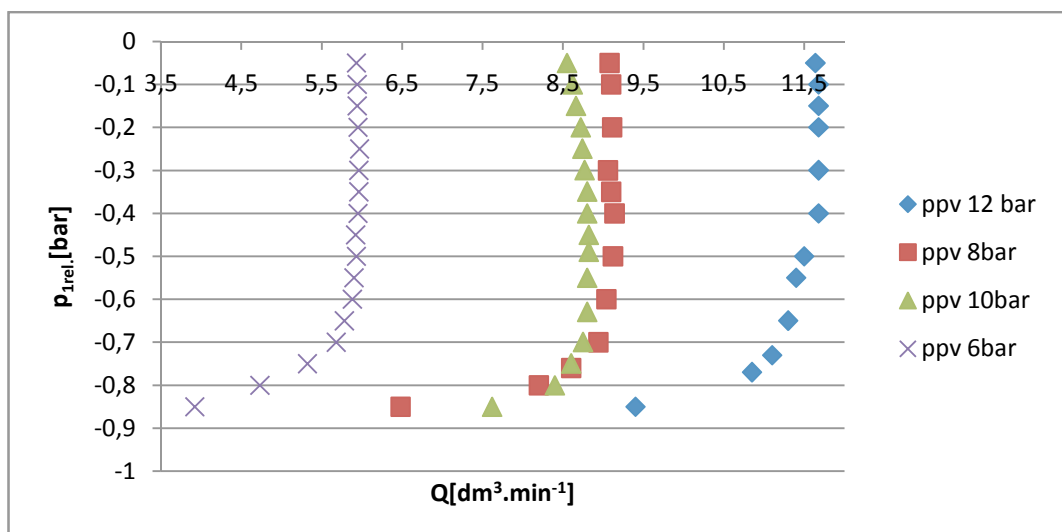
- p_{1 rel.} tlak (podtlak) na vakuometru V1 v sacím potrubí (změřeno).
- p_{2 rel.} tlak (přetlak) na manometru M1 ve výtlačném potrubí za čerpadlem (změřeno).
- p_{1 abs.} absolutní tlak v sací potrubí (vypočteno).
- p_{2 abs.} absolutní tlak ve výtlačném potrubí za čerpadlem (vypočteno).
- Δp rozdíl tlaků (p₁) a (p₂) (vypočteno)
- Q průtok hydrogenerátoru HG (vypočteno)
- n otáčky hydromotoru HM (naměřeno)

4.6 Grafické vyhodnocení

Na obr. 4.4 je zobrazena závislost $p_{1rel.} = f(Q)$ pro nastavení tlaku na pojistném ventilu PV $p_{pv}=6$ bar a na obr. 4.5 je grafické vyhodnocení pro všechna měření kavitace na sání čerpadla. Další jednotlivá grafická vyhodnocení jsou v příloze A1 – A3.



Obr. 4.4 Závislost relativního tlaku ($p_{1rel.}$) na průtoku (Q) na sání čerpadla pro nastavený tlak na pojistném ventilu $p_{pv}=6$ bar



Obr. 4.5 Závislost relativního tlaku ($p_{1rel.}$) na průtoku (Q) na sání čerpadla pro všechny nastavení tlaků na pojistném ventilu

Teplota pracovní kapaliny při měření: $t=35$ °C

4.7 Zhodnocení měření kavitace na sání čerpadla

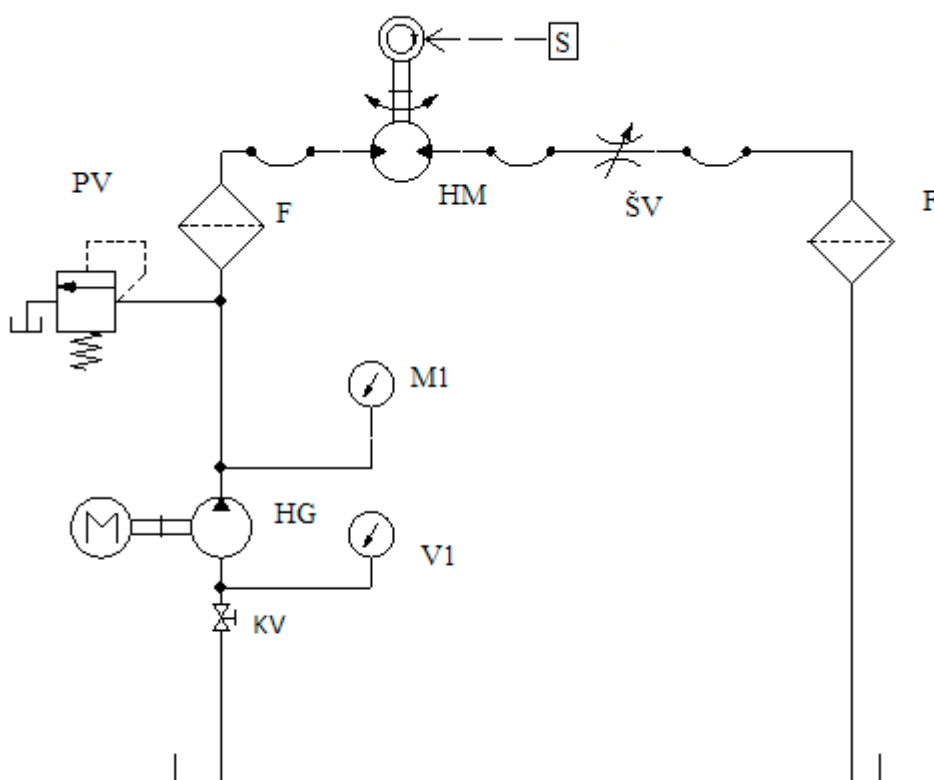
Jako první jsem si navrhl a následně sestavil na praktikátoru od firmy Parker hydraulický obvod, na kterém jsem následně simuloval kavitaci na sání čerpadla. Tento obvod jsem sestavil bez zátěže, tedy k čerpadlu jsem připojil pouze hydromotor obr. 4.2. Kavitaci jsem simuloval pomocí kulového ventilu umístěného v sacím potrubí. Měření jsem provedl při podtlaku ($0,05 \div 0,85$) bar, jak je patrné z tab. 4. Dále jsem provedl výpočty (průtoku, absolutních tlaků a tlakového spádu) a zpracoval grafy z měření Q - p_{1rel} charakteristiky. Jak je z grafů na obr. 4.5, přílohy A1, A2, A3 a z tab. 4.1 – 4.4 patrné při podtlaku (p_{1rel}) cca ($0,05 \div 0,3$) bar pracuje čerpadlo beze změn, průtok i tlaku ve výtlačném potrubí je téměř konstantní. Čerpadlo mělo při měření v tomto rozsahu standardní hlučnost, z tohoto hlediska lze usoudit, že v tomto rozmezí podtlaku se kavitační jev nevyskytuje. Při dalším zvyšování podtlaku pomocí kulového ventilu, a to v rozmezí podtlaku (p_{1rel}) cca ($0,3 \div 0,65$) bar, lze sledovat snižování průtoku, tlaku ve výtlačném potrubí a to má za následek charakteristickou nepravidelnou hlučnost zubového čerpadla. Lze usoudit, že v tomto rozsahu se vyskytuje kavitační jev, a to jako počáteční kavitace až částečně rozvinutá kavitace v sání čerpadla. Při podtlaku (p_{1rel}) cca ($0,7 \div 0,85$) bar lze vypožorovat, jak z grafů obr. 4.5, přílohy A1, A2, A3 tak z tabulky tab. 4 prudký pokles průtoku i tlaku ve výtlačném potrubí. Čerpadlo vyvozovalo velkou hlučnost a dodávalo nerovnoměrný průtok do systému. Z tohoto lze usoudit, že se jedná o plně rozvinutou kavitaci na sání čerpadla. Z měření lze usoudit, že pokud hydraulický obvod pracuje při vyšších tlacích, na kavitaci na sání čerpadla to nemá žádný vliv. Kavitace je ovlivňována pouze podtlakem v sacím potrubí.

5. Měření kavitace na sání čerpadla pomocí hydraulického stendu se zátěží

Na základě návrhu hydraulického obvodu jsem sestavil obvod na praktikátoru od firmy Parker. Tento obvod jsem sestavil se zátěží, kde zátěž je vyvozena pomocí škrticího ventilu ŠV. Kavitaci jsem vyvozoval pomocí kulového ventilu KV umístěného v sacím potrubí. Detail je na obr. 4.3. Pro jednotlivé polohy jsem měřil podtlak v sání (p_{1rel}), tlak ve výtlačném potrubí (p_{2rel}) a otáčky (n) hydromotoru HM. Měření jsem provedl při nastavených tlacích (18, 20 a 22) bar na pojistném ventilu PV. Následně jsem hodnoty vyhodnotil do grafů.

5.1 Schéma

Schéma zapojení obvodu se zátěží pro měření kavitace na zubovém hydrogenerátoru HG je znázorněno na obr 5.1.



Obr. 5.1 Schéma zapojení hydraulického obvodu

5.2 Specifikace prvků

HG – Hydrogenerátor PGP511A0080AA1H2NE5EB1B1

M1 – Manometr PGF.1001.100

V1 - Vakuometr P6G-FRA1V10 (rozsah 0 až -1 bar, přesnost 1,6%, maximální teplota kapaliny 60°C)

HM – Hydromotor PGM511A0100BL6H2NE3E3B1B1N2

S – Snímač otáček

KV – Kulový ventil KH18LCFX

PV – Pojistný ventil RDM2PT06KGV

M – Elektromotor 1,5kW, 220 V, Siemens 1LF 7096-4AB10-Z

F – Filtř 15CN210QEV MKG124

ŠV – škrťící ventil jehloví 9MV400SV

Foto zapojení hydraulického obvodu se zátěží na praktikátoru od firmy Parker je znázorněno na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Reálné zapojení hydraulického obvodu se zátěží

5.3 Postup měření

1. Nejdříve jsem zapojil obvod na praktikátoru od firmy Parker podle schématu, které je znázorněno na obr. 5.1.
2. Následně jsem nastavil požadovaný tlak (18, 20 nebo 22) bar na pojistném ventilu PV. Poté jsem spustil hydrogenerátor HG při otevřeném kulovém ventilu KV na sání čerpadla.
3. Do připravené tabulky jsem si zaznamenával otáčky n hydromotoru HM, tlak v sacím potrubí (p_{1rel}) a tlak ve výtlačném potrubí čerpadla (p_{2rel})
4. Následně jsem přivřel kulový ventil KV o tlak cca (-0,1 ÷ -0,05) bar na vakuometru a poté opět odečetl hodnoty jako v kroku 3.
5. Opakoval jsem kroky 3 a 4 do podtlaku na sání čerpadla 0,8 bar.
6. Po dokončení měření jsem přestavil pojistný ventil PV na další hodnotu, jak je uvedeno v bodě 2. Celé měření jsem následně opakoval.
7. Vypočítal jsem průtok (Q), tlakový spád (Δp), absolutní tlaky ($p_{1abs.}$), ($p_{2abs.}$) a sestrojil jsem grafy $p_{1rel.} = f(Q)$

5.4 Výpočetní vztahy

Vzorový výpočet pro hodnoty 6. měření viz tab. 5.1.

Průtok Q :

$$Q = V_g \cdot n = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1115 = 11,15 [dm^3 \cdot min^{-1}] \quad (5.1)$$

, kde $V_g = 10 \cdot 10^{-3} dm^3$

Tlakový spád Δp :

$$\Delta p = p_2 - p_1 = 18 - (-0,5) = 18,5 [bar] \quad (5.2)$$

Výpočet absolutních tlaků $p_{1abs.}$ a $p_{2abs.}$:

$$p_{1abs} = p_{1rel.} + p_{atm.} = -0,5 + 1,0125 = 0,513 [bar] \quad (5.3)$$

$$p_{2abs} = p_{2rel.} + p_{atm.} = 18 + 1,0125 = 19,0125 [bar] \quad (5.4)$$

5.5 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

Hodnoty v tab. 5.1 při vyvození tlaku 18 bar, v tab. 5.2 při tlaku 20 bar a v tab. 5.3 22 bar v tlakovém potrubí pomocí škrťacího ventilu ŠV.

č. m.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				Zvuk HG
	p _{1 rel.}	p _{2 rel.}	n	p _{1 abs.}	p _{2 abs.}	Δp	Q	
[-]	[bar]	[bar]	[min ⁻¹]	[bar]	[bar]	[bar]	[dm ³ .min ⁻¹]	[-]
1	-0,05	18	1116	0,963	19,013	18,05	11,16	standardní hlučnost HG (bez kavitace)
2	-0,1	18	1119	0,913	19,013	18,10	11,19	
3	-0,2	18	1121	0,813	19,013	18,20	11,21	
4	-0,3	18	1120	0,713	19,013	18,30	11,2	nepravidelný charakteristický zvuk HG (počáteční kavitace částečně rozvinutá kavitace)
5	-0,4	18	1121	0,613	19,013	18,40	11,21	
6	-0,5	18	1115	0,513	19,013	18,50	11,15	
7	-0,6	17,5	1100	0,413	18,513	18,10	11	velká hlučnost HG (plně rozvinutá kavitace)
8	-0,7	16,1	1075	0,313	17,113	16,80	10,75	
9	-0,8	12,3	895	0,213	13,313	13,10	8,95	

Tab. 5.1 Hodnoty při simulaci kavitace při tlaku 18 bar na tlakovém potrubí

č.měř.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				Zvuk HG
	p _{1 rel.}	p _{2 rel.}	n	p _{1 abs.}	p _{2 abs.}	Δp	Q	
[-]	[bar]	[bar]	[min ⁻¹]	[bar]	[bar]	[bar]	[dm ³ .min ⁻¹]	[-]
1	-0,01	20	1153	1,003	21,013	20,01	11,53	standardní hlučnost HG
2	-0,05	19,9	1153	0,963	20,913	19,95	11,53	
3	-0,1	19,9	1153	0,913	20,913	20,00	11,53	
4	-0,15	19,8	1152	0,863	20,813	19,95	11,52	
5	-0,2	19,1	1150	0,813	20,113	19,30	11,50	
6	-0,25	18,5	1147	0,763	19,513	18,75	11,47	
7	-0,3	18,1	1143	0,713	19,113	18,40	11,43	nepravidelný charakteristický zvuk HG (počáteční kavitace částečně vyvinutá kavitace)
8	-0,35	18,1	1140	0,663	19,113	18,45	11,40	
9	-0,4	18,1	1140	0,613	19,113	18,50	11,40	
10	-0,45	18,0	1136	0,563	19,013	18,45	11,36	
11	-0,5	18,0	1135	0,513	19,013	18,50	11,35	
12	-0,55	18,0	1128	0,463	19,013	18,55	11,28	
13	-0,6	17,8	1120	0,413	18,813	18,40	11,20	velká hlučnost HG (plně vyvinutá kavitace)
14	-0,65	17,7	1115	0,363	18,713	18,35	11,15	
15	-0,7	17,0	1104	0,313	18,013	17,70	11,04	
16	-0,75	17,5	1080	0,263	18,513	18,25	10,80	
17	-0,8	15,5	980	0,213	16,513	16,30	9,80	

Tab. 5.2 Hodnoty při simulaci kavitace při tlaku 20 bar na tlakovém potrubí

č.měř.	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				Zvuk HG
	p _{1 rel.}	p _{2 rel.}	n	p _{1 abs.}	p _{2 abs.}	Δp	Q	
[-]	[bar]	[bar]	[min ⁻¹]	[bar]	[bar]	[bar]	[dm ³ .min ⁻¹]	[-]
1	-0,02	22	1141	0,993	23,013	22,02	11,41	standardní hlučnost HG (bez kavitace)
2	-0,05	22	1141	0,963	23,013	22,05	11,41	
3	-0,1	22	1140	0,913	23,013	22,10	11,40	
4	-0,15	22	1140	0,863	23,013	22,15	11,40	
5	-0,2	22	1138	0,813	23,013	22,20	11,38	
6	-0,25	21,9	1138	0,763	22,913	22,15	11,38	
7	-0,3	21,8	1135	0,713	22,813	22,10	11,35	nepravidelný charakteristický zvuk HG (počáteční kavitace, částečně vyvinutá kavitace)
8	-0,35	21,8	1131	0,663	22,813	22,15	11,31	
9	-0,4	21,5	1128	0,613	22,513	21,90	11,28	
10	-0,45	21,5	1125	0,563	22,513	21,95	11,25	
11	-0,5	21,0	1120	0,513	22,013	21,50	11,20	
12	-0,55	21,0	1116	0,463	22,013	21,55	11,16	
13	-0,6	21,0	1110	0,413	22,013	21,60	11,10	velká hlučnost HG (plně vyvinutá kavitace)
14	-0,65	21,5	1102	0,363	22,513	22,15	11,02	
15	-0,7	20,0	1086	0,313	21,013	20,70	10,86	
16	-0,76	18,0	1025	0,253	19,013	18,76	10,25	

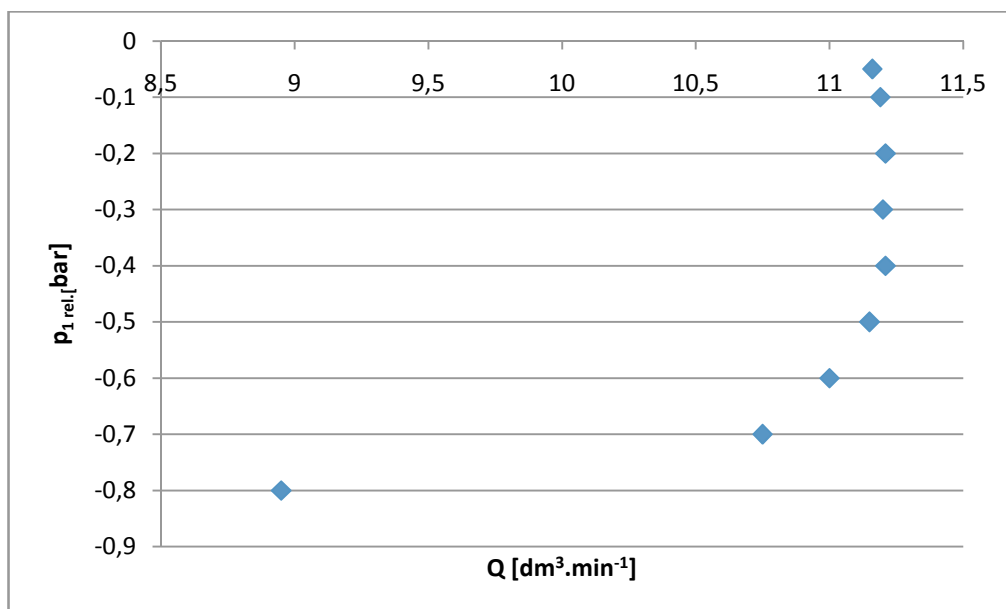
Tab. 5.3 Hodnoty při simulaci kavitace při tlaku 22 bar na tlakovém potrubí

Legenda k tab. 5.1 - 5.3.

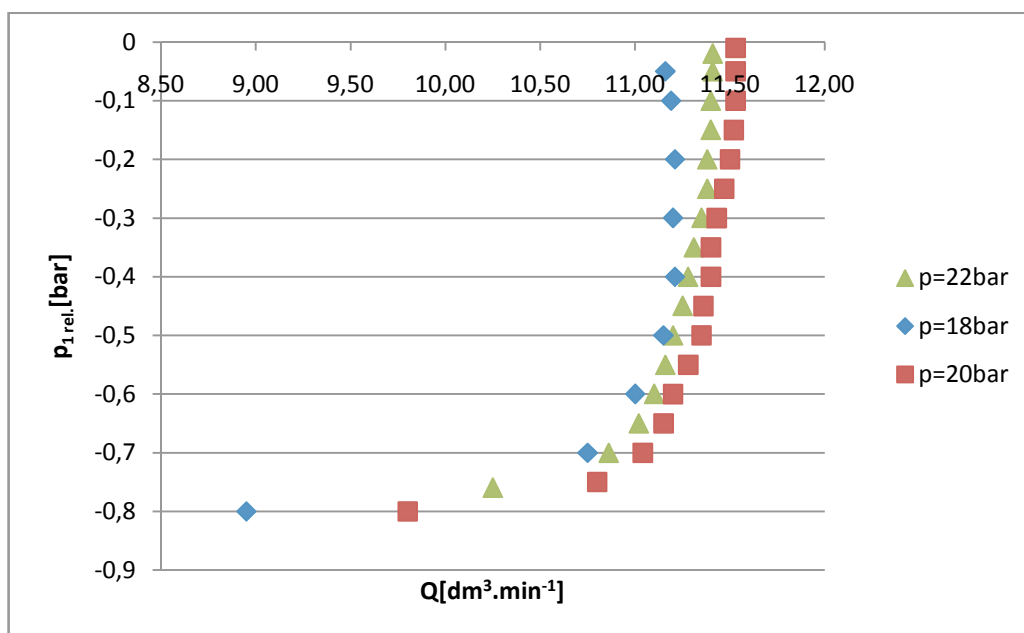
- p_{1 rel.} tlak (podtlak) na vakuometru V1 v sacím potrubí (změřeno)
- p_{2 rel.} tlak (přetlak) na manometru M1 ve výtlačném potrubí za čerpadlem (změřeno)
- p_{1 abs.} absolutní tlak v sacím potrubí (vypočteno)
- p_{2 abs.} absolutní tlak ve výtlačném potrubí za čerpadlem (vypočteno).
- Δp rozdíl tlaků (p₁) a (p₂) (vypočteno)
- Q průtok hydrogenerátoru HG (vypočteno)
- n otáčky hydromotoru HM (naměřeno)

5.6 Grafické vyhodnocení

Zobrazení závislost ($p_{1rel.}$) na (Q) je na obr. 5.3 při nastavení na pojistném ventilu PV 18 bar. Na obr. 5.4 je grafické vyhodnocení všech naměřených hodnot. Další grafické vyhodnocení je umístěno v příloze A4 a A5.



Obr. 5.3 Závislost relativního tlaku ($p_{1rel.}$) na průtoku (Q) na sání čerpadla pro nastavený tlak na pojistném ventilu $p_{pv}=18\text{bar}$



Obr. 5.4 Závislost relativního tlaku ($p_{1rel.}$) na průtoku (Q) na sání čerpadla pro všechny nastavení tlaků na pojistném ventilu

5.7 Vyhodnocení měření kavitace

V první fázi jsem provedl návrh hydraulického obvodu a následně jsem hydraulický obvod sestavil na praktikátoru od firmy Parker. Tento hydraulický obvod jsem navrhl se zátěží, kde zátěž představuje škrtící ventil. Kavitaci jsem simuloval pomocí kulového ventilu umístěného v sání čerpadla. Měření jsem provedl pro tři nastavení na pojistném ventilu, a to 18, 20 a 22 bar. Měření jsem provedl v rozmezí podtlaku ($0,01 \div 0,8$) bar. Dále jsem provedl výpočty (průtoků, absolutních tlaků a tlakového spádu) a zpracoval grafy z měření $Q-p_{rel}$ charakteristiky. Z výsledků měření viz tab. 5 a obr. 5.4, obr. 5.3 a přílohy A4 a A5 lze usoudit, že při podtlaku cca ($0,01 \div 0,25$) bar nedochází ke změně průtoku ani tlaku ve výtlačném potrubí, z čehož lze usoudit, že kavitace na sání čerpadla se nevytváří. Dále lze vyčíst z výsledků měření, že při podtlaku cca ($0,3 \div 0,65$) bar se již kavitace na sání čerpadla vyskytuje a to jako počáteční až částečně rozvinutá. Dalším jevem v tomto rozmezí podtlaku je nepravidelný charakteristický zvuk čerpadla, také pokles průtoku čerpadla a pokles tlaku ve výtlačném potrubí. V další oblasti podtlaku, a to cca ($0,7 \div 0,8$) bar se kavitace projevuje na čerpadle velkou hlučností, prudkým poklesem průtoku a tlaku ve výtlačném potrubí. Z tohoto lze usoudit, že se jedná o plně rozvinutou kavitaci na sání čerpadla. Porovnáním výsledků z měření na obvodu bez zátěže a se zátěží lze usoudit, že zátěž nemá vliv na tvorbu kavitace na sání čerpadla, ale hlavním faktorem pro tvorbu kavitace je podtlak v sacím potrubí.

6. Návod do cvičení pro měření kavitace na trenažeru od firmy Parker

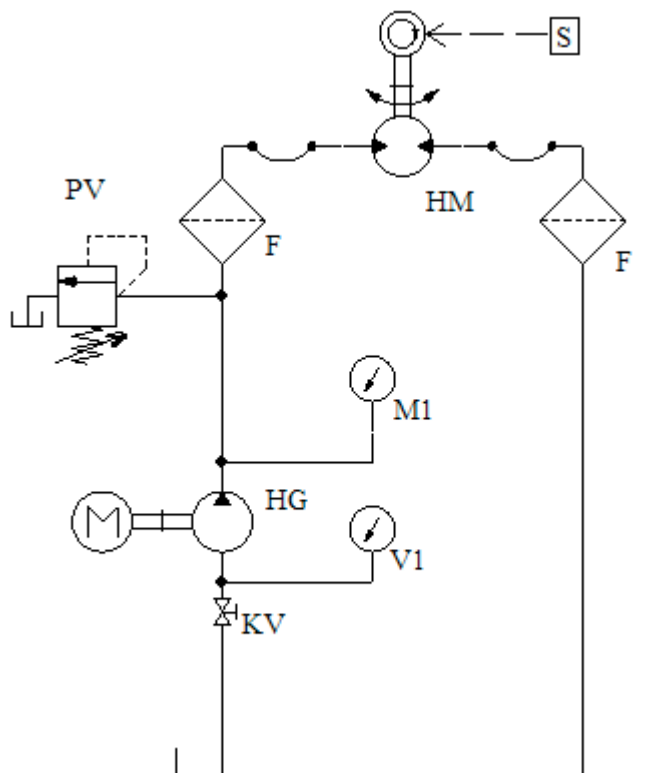
Kavitace je nepříznivý jev, při kterém se vylučují a následně zanikají plynové bubliny v proudící kapalině. Ke kavitaci může dojít na sání čerpadla, když díky vyšším otáčkám případně dalším vlivům (vysoká viskozita, velké odpory v sacím potrubí apod.) dojde k tomu, že tlak na sání čerpadla dosahuje tlaku nasycených par dané kapaliny. Kapalina se vypařuje, páry tvoří bublinky a jejich zánik po přechodu do tlakového prostoru způsobuje poškození funkčních částí hydraulických prvků (např. lopatky čerpadel). [6]

6.1 Zadaní

Pro daný hydraulický obvod simulujte kavitaci na sání čerpadla. Kavitaci vyvoďte pomocí kulového ventilu KV obr. 6.3 umístěného v sacím potrubí. V měření začněte s otevřeným kulovým ventilem KV. Zaznamenávejte podtlak v sacím potrubí ($p_{1\text{ter.}}$), tlak ($p_{2\text{ter.}}$) ve výtlačném potrubí a otáčky n na hydromotoru HM do tabulky. Vyhodnoťte hodnoty podtlaku ($p_{1\text{rel.}}$) a průtoku (Q) do grafu. Dále popište zvuky, které čerpadlo vydává při měření kavitace. Měření proveďte pro různé nastavení pojistného ventilu PV (např. 6, 8, 10 a 12 bar).

6.2 Schéma zapojení

Schéma zapojení obr. 6.1 pro měření kavitace na zubovém hydrogenerátoru. Zapojení je bez zátěže.



Obr. 6.1 Schéma zapojení hydraulického obvodu

6.3 Specifikace prvků

HG – Hydrogenerátor PGP511A0080AA1H2NE5EB1B1

M1,M2 – Manometr PGF.1001.100

V1 - Vakuometr P6G-FRA1V10 (rozsah 0 až -1 bar, přesnost 1,6%, maximální teplota kapaliny 60°C)

HM – Hydromotor PGM511A0100BL6H2NE3E3B1B1N2

S – Snímač otáček

KV – Kulový ventil KH18LCFX

PV – Pojistný ventil RDM2PT06KGV

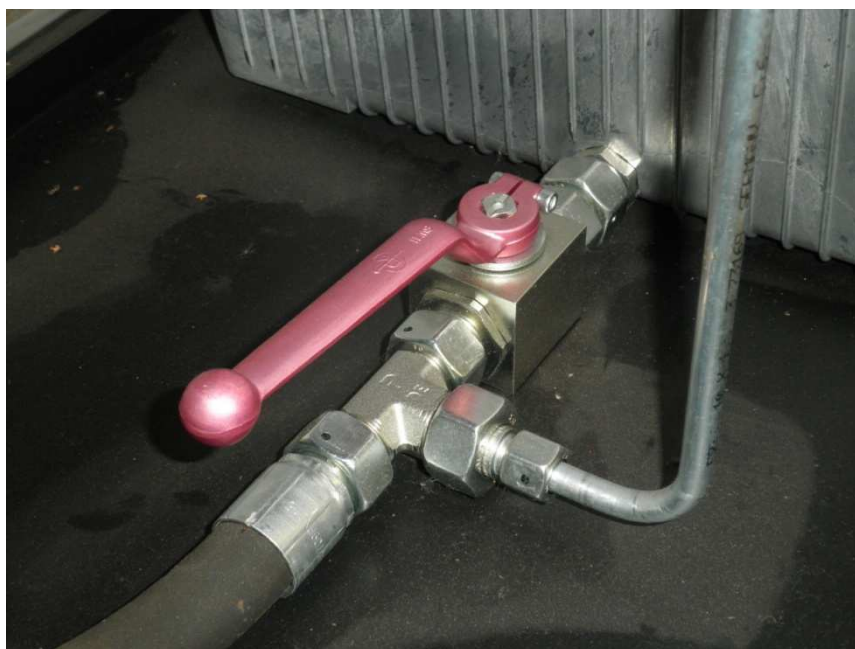
M – Elektromotor 1,5kW, 220 V, Siemens 1LF 7096-4AB10-Z

F – Filtř 15CN210QEVMKG124

Foto zapojení měřeného hydraulického obvodu na standu je znázorněno na obr. 6.2, na obr. 6.3 je detail kulového ventilu, kterým simulujete kavitaci.



Obr. 6.2 Reálné zapojení hydraulického obvodu na praktikátoru od firmy Parker



Obr. 6.3 Detail kulového ventilu umístěného na sání čerpadla

6.4 Postup měření

1. Zapojte obvod na praktikátoru od firmy Parker Hannifin podle schématu viz obr. 6.1.
2. Nastavte na pojistném ventilu PV požadovaný maximální tlak, zkontrolujte, jestli je kulový ventil KV na sání otevřen a následně zapněte hydrogenerátor HG.
3. Odečtěte hodnoty na vakuometru V1 ($p_{1rel.}$), manometru M2 ($p_{2rel.}$) a otáčky n ze snímače S na hydromotoru HM a charakterizujte zvuky vydávající čerpadlo.
4. Přivřete kulový ventil KV tak, aby se hodnota na vakuometru V snížila o $(0,05 \div 0,1)$ bar a proveďte krok 3.
5. Opakujte kroky 3 a 4.
6. Po dokončení měření otevřete kulový ventil a vypněte hydrogenerátor HG.
7. Měření proveďte pro 3 hodnoty na pojistném ventilu PV př. 6, 8 a 10 bar.
8. Následně vyhodnoťte výsledky měření do tabulek a do grafů.

(Pozn. Čerpadlo neponechávejte delší dobu ve stavu vyšší kavitace, což je podtlak nad minus 20kPa (-0,2 bar).)

6.5 Zpracování naměřených hodnot

Aby bylo možné vytvořit graf průtoku závislého na podtlaku Q - $p_{1rel.}$, je nutné znát průtok. Ten vypočítejte z rovnice: $Q = V_g \cdot n = [dm^3 \cdot min^{-1}]$, kde $V_g = 10cm^3$, otáčky (n) byly odečteny z měření. Taktéž i podtlak ($p_{1ter.}$), ze kterého přičtením atmosférického tlaku (p_{atm}) získáte absolutní tlak ($p_{1abs.}$) v sacím potrubí. Také vypočítejte tlakový spád na hydrogenerátoru HG, ten získáme odečtením hodnot tlaku na manometru M1 (přetlak) a vakuometru V1 (podtlak). Dále vypočítejte absolutní tlak ($p_{2abs.}$) přičtením atmosférického tlaku ($p_{atm.}$) k naměřeným hodnotám.

(Pozn. Průtoková účinnost nezatíženého hydromotoru HM je přibližně rovna 1).

6.6 Výpočet hodnot

Průtok Q :

$$Q = V_g \cdot n = [dm^3 \cdot min^{-1}], \quad (6.1)$$

$$\text{kde } V_g = 10 \cdot 10^{-3} dm^3$$

Tlakový spád Δp :

$$\Delta p = p_2 - p_1 = [bar] \quad (6.2)$$

Vypočet absolutních tlaků $p_{1abs.}$ a $p_{2abs.}$:

$$p_{1abs} = p_{1rel.} + p_{atm.} = [bar] \quad (6.3)$$

$$p_{2abs} = p_{2rel.} + p_{atm.} = [bar] \quad (6.4)$$

6.7 Tabulka naměřených a vypočtených hodnot

Tab. 6.1 Vzorová tabulka naměřených a vypočtených hodnot

č.měř	Naměřené hodnoty			Vypočtené hodnoty				Zvuk HG
	$p_{1\text{ ter.}}$	$p_{2\text{ ter.}}$	n	$p_{1\text{ abs.}}$	$p_{2\text{ abs.}}$	Δp	Q	
[-]	[bar]	[bar]	[min ⁻¹]	[bar]	[bar]	[bar]	[dm ³ .min ⁻¹]	[-]
1								
2								
3								
4								
5								
6	-0,4	8	914	0,613	9,013	8,40	9,14	nepravidelný charakteristický zvuk HG
7								
8								
9								
10								
11								
12								

Legenda k tab. 6.1:

- $p_{1\text{ ter.}}$ tlak (přetlak) na vakuometru V1 v sacím potrubí (změřeno).
- $p_{2\text{ ter.}}$ tlak (podtlak) na manometru M1 ve výtlačném potrubí za čerpadlem (změřeno).
- $p_{1\text{ abs.}}$ absolutní tlak v sacím potrubí (vypočteno).
- $p_{2\text{ abs.}}$ absolutní tlak ve výtlačném potrubí za čerpadlem (vypočteno).
- Δp rozdíl tlaků (p_1) a (p_2) (vypočteno)
- Q průtok hydrogenerátoru HG (vypočteno)
- n otáčky hydromotoru HM (naměřeno)

6.8 Příklad výpočtu pro měření č. 6

Průtok Q:

$$Q = V_g \cdot n = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 914 = 9,14[\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}] \quad (6.5)$$

$$\text{, kde } V_g = 10 \cdot 10^{-3} \text{ dm}^3$$

Tlakový spád Δp :

$$\Delta p = p_2 - p_1 = 8 - (-0,4) = 8,4[\text{bar}] \quad (6.6)$$

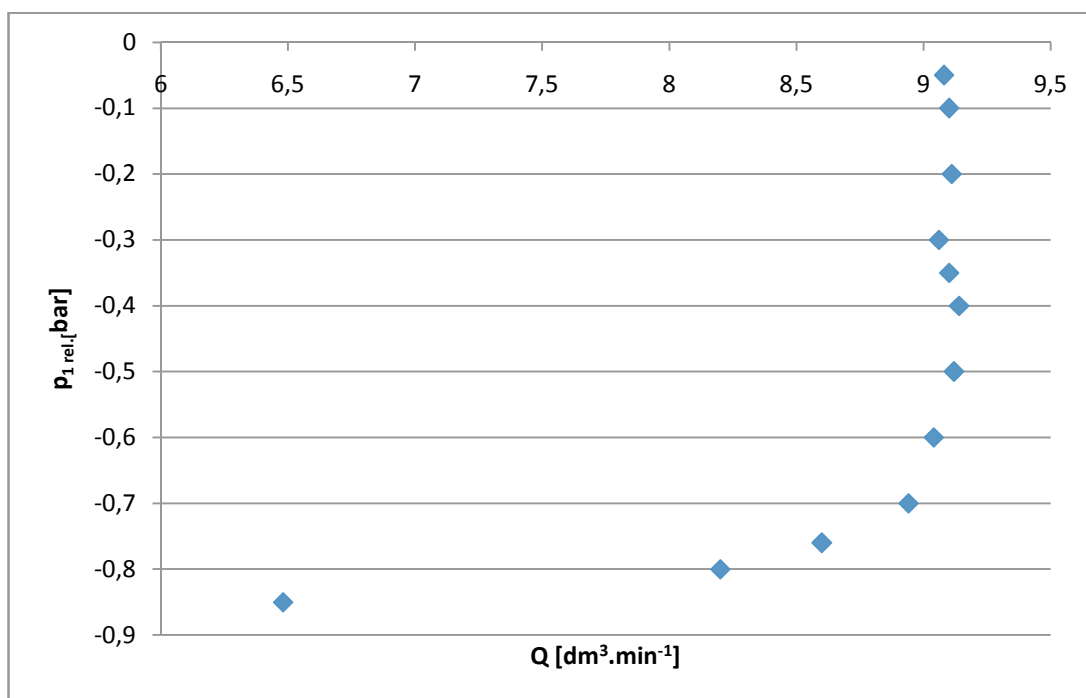
Vypočet absolutních tlaků $p_{1\text{abs.}}$ a $p_{2\text{abs.}}$:

$$p_{1\text{abs}} = p_{1\text{ter.}} + p_{\text{atm.}} = -0,4 + 1,0125 = 0,613[\text{bar}] \quad (6.7)$$

$$p_{2\text{abs}} = p_{2\text{ter.}} + p_{\text{atm.}} = 8 + 1,0125 = 9,0125[\text{bar}] \quad (6.8)$$

6.9 Grafické vyhodnocení

Na obr. 6.4 je znázorněna závislost podtlaku ($p_{1\text{rel.}}$) na průtoku (Q).



Obr. 6.4 Závislost relativního tlaku ($p_{1\text{rel.}}$) na průtoku (Q) na sání čerpadla pro nastavený tlak na pojistném ventilu $p_{\text{pv}}=8\text{bar}$

Teplota pracovní kapaliny: $t=35^\circ\text{C}$

6.10 Závěr

Byly provedeny výpočty a zpracovány grafy z měření $Q-p_{rel.}$ charakteristiky. Z grafu lze vidět, že kavitace se neprojevuje při podtlaku cca $(0,05 \div 0,3)$ bar, čerpadlo má standardní hlučnost a lze usoudit, že kavitační jev se na sání čerpadla nevyskytuje. Při hodnotách podtlaku cca $(0,3 \div 0,7)$ bar má čerpadlo nepravidelnou charakteristickou hlučnost a zde se už kavitace vyskytuje, a to jako počáteční až částečně rozvinutá. Navýšením podtlaku na hodnoty cca $(0,7 \div 0,85)$ bar začne mít čerpadlo značnou hlučnost, z čehož lze usoudit, že v čerpadle na sání je plně rozvinutá kavitace

7. Závěr

Na začátku teoretické části bakalářské práce v kapitole 1 byl popsán kavitační jev vyskytující se v hydraulických systémech. V práci jsou popsány fyzikální vlastnosti kavitace. Dále jsou v bakalářské práci popsány druhy kavitací v hydraulických systémech a její dopad na hydraulické obvody.

V druhé části bakalářské práce v kapitole 2 je popsána problematika stlačitelnosti kapaliny. Stlačitelnost kapaliny je ovlivněna dvěma způsoby, a to rozpuštěným a nerozpuštěným vzduchem. V bakalářské práci jsou popsány oba tyto druhy ovlivňující stlačitelnost kapaliny.

V praktické části bakalářské práce jsem se zabýval návrhem a sestavením hydraulického obvodu na měření kavitace na sání čerpadla. V této práci jsem navrhl dva hydraulické obvody. Tyto obvody jsem realizoval na praktikátoru od firmy Parker Hannifin.

První hydraulický obvod na měření kavitace na sání čerpadla jsem sestavil bez zátěže, tzn. k čerpadlu je připojen pouze rotační hydromotor. Měření jsem provedl pro čtyři nastavení na pojistném ventilu a to 6, 8, 10 a 12 bar, abych zjistil, jaký vliv má maximální tlak v hydraulickém obvodu na vznik kavitace. Veškeré výsledky jsou uvedeny v kapitole 4. Při tomto měření jsem zjistil, že pokud hydraulický obvod pracuje s různými tlaky, kavitace na sání neovlivňuje, jelikož jsem při měření došel k závěru, že vliv na vývoj kavitace má podtlak v sacím potrubí. Jak je patrné z naměřených hodnot, kavitace měla stejný průběh u všech měření.

Dále je v bakalářské práci navrhnut a sestaven druhý hydraulický obvod se zátěží, kde zátěž představuje škrťací ventil, který je umístěn za rotačním hydromotorem. Měření bylo provedeno pro tři hodnoty, a to 19, 20 a 22 bar nastavené na pojistném ventilu. Toto měření bylo zaměřeno na vliv zátěže na vznik kavitace na sání čerpadla. Z naměřených hodnot viz kapitola 5, vyplývá, že zátěž nemá žádný vliv na kavitaci v sání čerpadla. Dospělo se k výsledkům jako v předešlé úloze, že největší vliv má podtlak na sacím potrubí.

Při měření na hydraulických obvodech jsem došel k výsledkům, že v rozmezí podtlaku $(0,01 \div 0,3)$ bar se kavitační jev nevyskytuje na sání čerpadla. Při podtlaku $(0,3 \div 0,65)$ bar se kavitace již vytváří a jedná se o počáteční až částečně rozvinutou kavitaci. Čerpadlo má nepravdělnou charakteristickou hlučnost a mírný pokles průtoku (Q). Při dosažení podtlaku

(0,65 ÷ 0,85) bar se jedná o plně rozvinutou kavitaci na sání čerpadla, projevuje se prudkým snížením průtoku, tlaku na výtlačném potrubí a čerpadlo má značnou hlučnost.

Na závěr bakalářské práce jsem vypracoval návod do cvičení pro měření kavitace na sání čerpadla pomocí kulového ventilu umístěného v sacím potrubí. Návod uvedený v kapitole 6 bude k dispozici studentům při měření v předmětech, např. technická diagnostika a spolehlivost hydraulických mechanismů, tekutinových mechanismech aj.).

8. Seznam použité literatury

- [1] NOSLIEVIČ, J. A KOL. *Kavitace v hydraulických strojích a zařízeních*. 1. vyd. STNL Praha, 1989. 336 s.
- [2] NOSLIEVIČ, J. A KOL. *Kavitace*. 1. vyd. Academia Praha, 1969. 280 s.
- [3] KOZUBKOVÁ, M.: *Matematické modely kavitace a hydraulického rázu*. Ostrava: VŠB-TU 2009, 130 s., ISBN 978-80-248-2043-9.
- [4] DVOŘÁK, L. *Vlastnosti tekutin*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2010, 62 s.
- [5] BRENNEN, Christopher E. *Cavitation and bubble dynamics*. New York, Oxford University Press, 1995. 282s., ISBN 0-19-509409-3
- [6] CORPORATION, Parker Hannifin. *Základy hydrauliky. Manuál ke standu Parker*. české vydání: Bulletin, 2009. 93s.
- [7] KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Praha: SNTL, 1990. 159 s. ISBN 80-03-00308-3.
- [8] HRUŽÍK, L. *Experimentální úlohy v tekutinových mechanismech*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2008. 61 s. ISBN 978-80-248-1912-9.
- [9] PAVLOK, B.; HRUŽÍK, L., *Hydraulická zařízení strojů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 116s.
- [10] Kavitace [online] 2011 [cit. 2011-12-12]. <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>>. Dostupné z WWW: <<http://cs.wikipedia.org>>
- [11] kavitační opotřebení [online] 2011 [cit. 2011-12-30]. <<http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12011/kavitacni-opotrebeni.html>>. Dostupné z WWW: <<http://www.tribotechnika.sk>>
- [12] Pivoňka, J. a kolektiv. *Tekutinové mechanismy*. SNTL Praha, 1987, 256s, 1. Vydání.
- [13] ŠŤAVA, P.; PAVLOK, B. *Mazací technika*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2006. 72 s. ISBN 80-248-100-X.

9. Seznam příloh

A1 – Závislost relativního tlaku (p_{1rel}) na průtoku (Q) na sání čerpadla pro nastavený tlak na pojistném ventilu $p_{\text{pv}}=8$ bar. Hydraulický obvod bez zátěže.

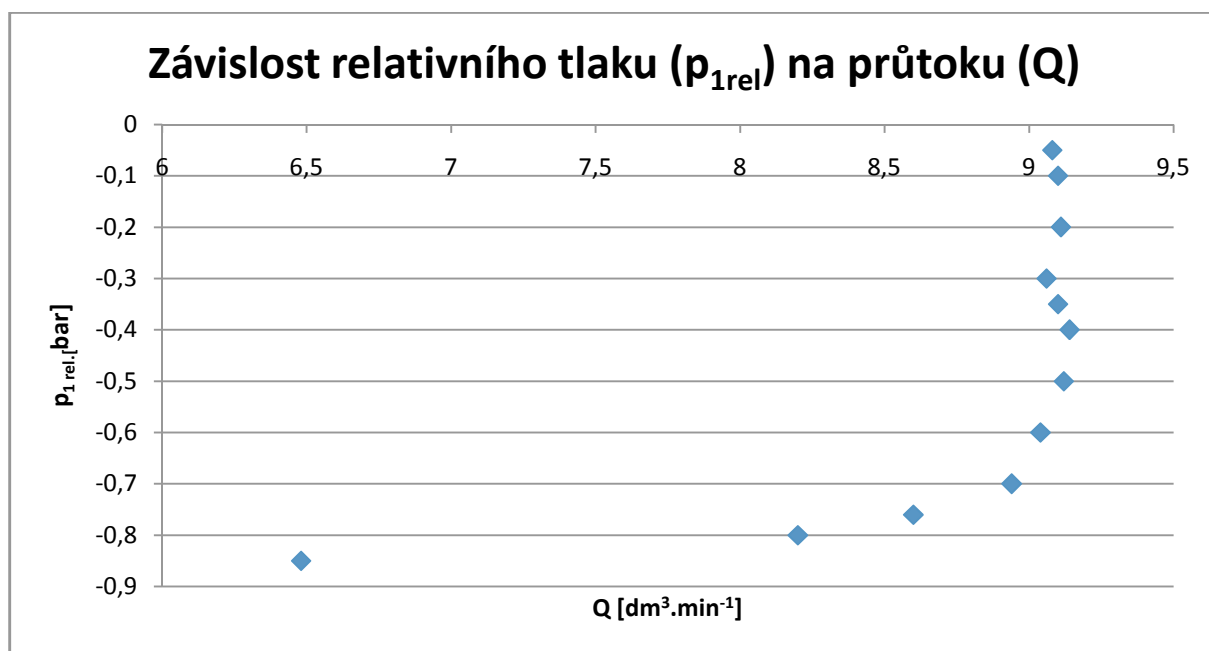
A2 - Závislost relativního tlaku (p_{1rel}) na průtoku (Q) na sání čerpadla pro nastavený tlak na pojistném ventilu $p_{\text{pv}}=10$ bar. Hydraulický obvod bez zátěže.

A3 - Závislost relativního tlaku (p_{1rel}) na průtoku (Q) na sání čerpadla pro nastavený tlak na pojistném ventilu $p_{\text{pv}}=12$ bar. Hydraulický obvod bez zátěže.

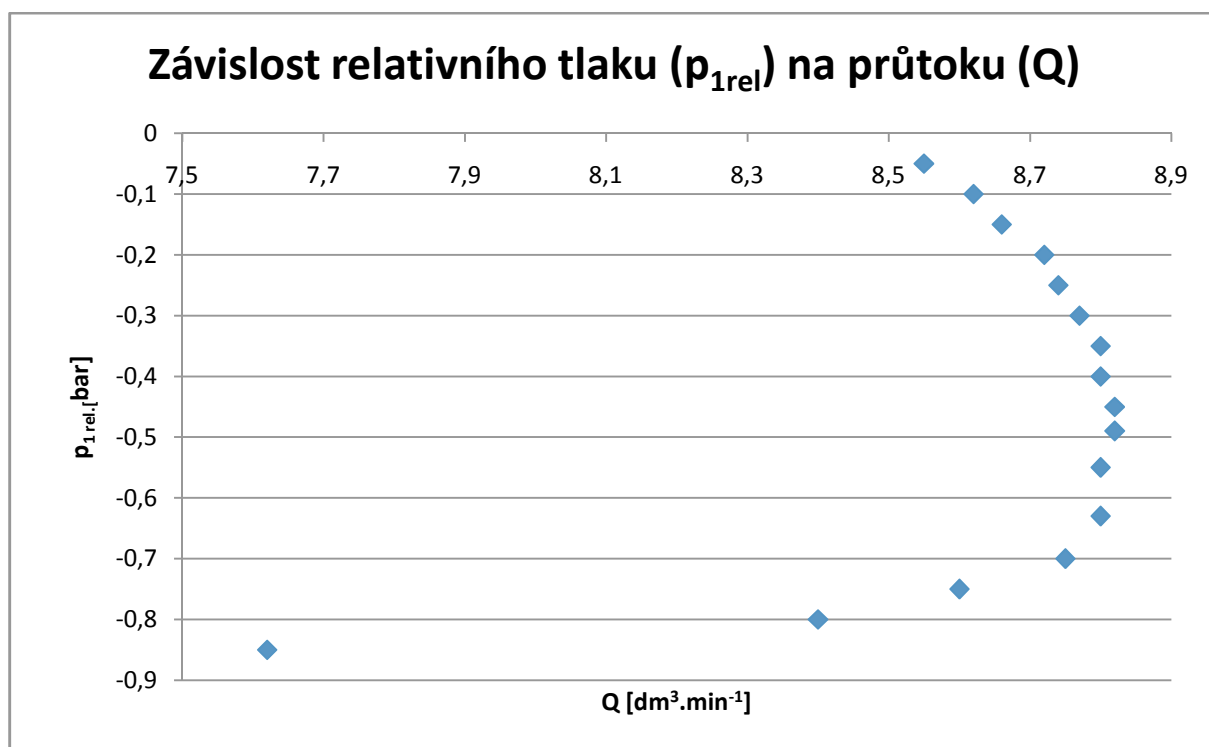
A4 - Závislost relativního tlaku (p_{1rel}) na průtoku (Q) na sání čerpadla pro nastavený tlak na pojistném ventilu $p_{\text{pv}}=20$ bar. Hydraulický obvod se zátěží.

A5 - Závislost relativního tlaku (p_{1rel}) na průtoku (Q) na sání čerpadla pro nastavený tlak na pojistném ventilu $p_{\text{pv}}=22$ bar. Hydraulický obvod se zátěží.

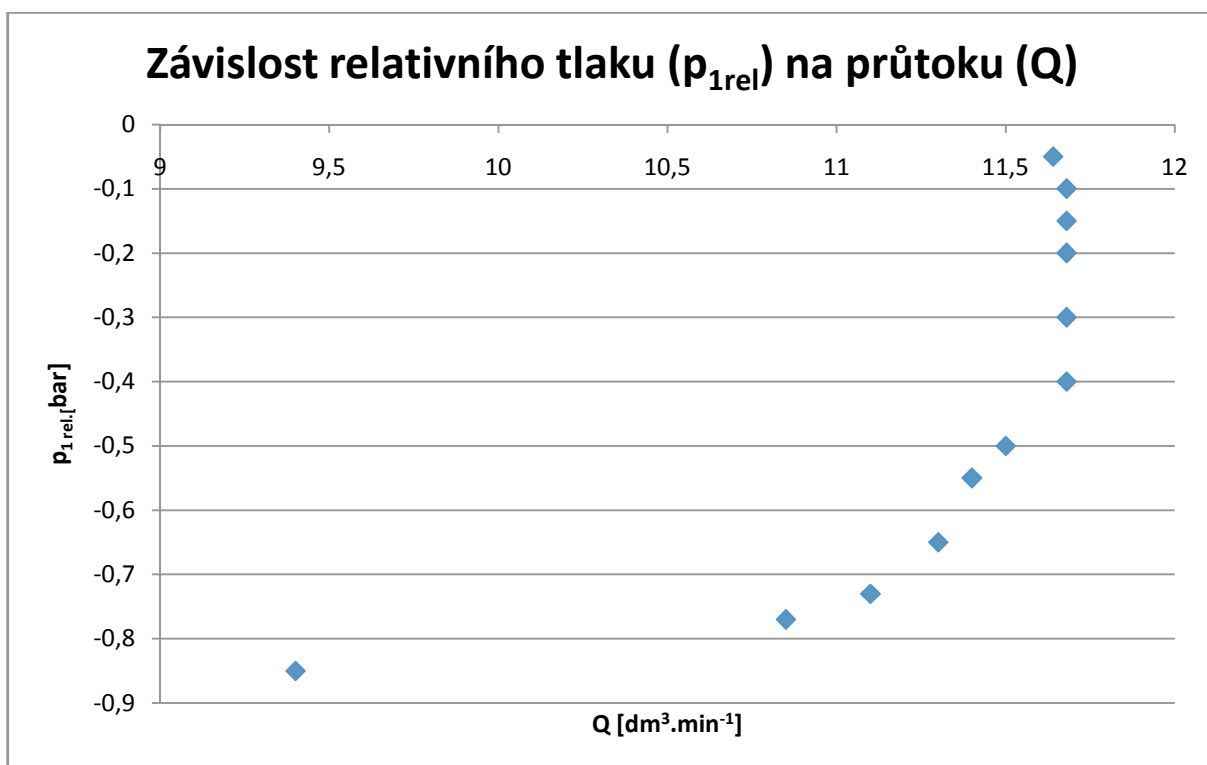
Příloha A1



Příloha A2



Příloha A3



Příloha A4

